

Izrada interferencijskog sustava za umjeravanje valne duljine lasera

Grbac, Alberto

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:803771>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Alberto Grbac

Zagreb, 2018 godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

doc. dr. sc. Marko Katić, dipl. ing.

Student:

Alberto Grbac

Zagreb, 2018 godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se roditeljima i Ani Filošević na velikoj podršci tokom cijelog studija, Ivani Kukolji na pomoći i strpljenju tokom izrade ovog rada te doc. dr. sc. Marku Katiću na prilici, strpljenju i ukazanom povjerenju pri izradi rada.

Alberto Grbac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Alberto Grbac**

Mat. br.: 0035170708

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izrada interferencijskog sustava za umjeravanje valne duljine lasera**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of Interferometric System for Laser Wavelength Calibration**

Opis zadatka:

Suvremene metode u mjeriteljstvu duljine u velikoj se mjeri oslanjaju na interferencijske sustave, pri čemu je od ključnog značaja poznavanje točnog iznosa korištene valne duljine. Ukoliko se umjerava valna duljina koja je bliska postojećim etalonskim laserima, tada je problem jednostavan i svodi se na frekvencijsku usporedbu dva lasera. Međutim, ukoliko se umjerava valna duljina čiji iznos nije blizak etalonu, tada se može primijeniti princip interferometrije za mjerenje pomaka pri čemu se isti pomak simultano mjeri i poznatom i nepoznatom valnom duljinom. U okviru zadanog rada student će:

- objasniti princip rada interferometara za mjerenje pomaka
- objasniti princip rada interferencijskih sustava za umjeravanje valnih duljina i dati pregled komercijalno dostupnih sustava
- predložiti praktičnu izvedbu opisanog sustava, imajući u vidu opremu dostupnu u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina (LFSB)
- izraditi predloženi sustav u LFSB
- provesti umjeravanje valne duljine jednog lasera, usporedbom s referentnim laserom iz LFSB.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
16. studenog 2017.

Datum predaje rada:
18. siječnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
24., 25. i 26. siječnja 2018.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Marko Katić

Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS GRAFOVA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Kratka povijest mjeriteljstva	3
1.2. Osnovni pojmovi u mjeriteljstvu.....	5
1.2.1. Načelo mjernog jedinstva u mjeriteljstvu	5
1.2.1.1. Mjeriteljska infrastruktura	6
1.2.1.2. Međunarodni sustav jedinica SI.....	10
1.2.1.3. Etalon	12
1.2.1.4. Umjeravanje i sljedivost	14
1.2.2. Kategorije u mjeriteljstvu	15
2. INTERFEROMETRIJA	16
2.1. Princip rada interferometra za mjerenje pomaka	17
2.2. Princip rada interferencijskih sustava za umjeravanje valnih duljina.....	21
2.2.1. Interferencijske metode bazirane na analizi faza interferencijskih linija.....	21
2.2.1.1. Lambdametar na osnovi Michelsonovog interferometra	23
2.2.1.2. Kowalskijev interferometar	25
2.2.2. Interferencijske metode bazirane na analizi periode interferencijskih linija	27
2.2.2.1. Fabry-Perot interferometar.....	27
2.2.2.2. Fizeau interferometer	29
2.2.2.3. Young-ov interferometar	30
2.2.3. Pregled komercijalno dostupnih sustava za umjeravanje valne duljine.....	31
2.2.3.1. Toptica HighFinesse WS serija.....	31
2.2.3.2. Bristol instruments	33
2.2.3.3. Keysight 86120D i 86122C Multi-Wavelength Meters.....	35

3. PRIJEDLOG PRAKTIČNE IZVEDBE INTERFERENCIJSKOG SUSTAVA ZA UMJERAVANJE VALNE DULJINE LASERA	36
3.1. Korištena oprema dostupna u laboratoriju	37
3.1.1. Postojeći uređaj	37
3.1.2. Thorlabs Helium-Neon Tunable Laser HTPS-EC-1	38
3.1.3. Thorlabs modularni optički elementi i postolja	39
3.1.4. Olympus LMPlanFL N mikroskopski objektiv	40
3.1.5. Thorlabs PM100USB + S120C.....	41
3.1.6. Thorlabs DET36A/M fotodetektor	42
3.1.7. PCI-DAS6034 akvizicijska kartica	43
3.1.8. Renishaw ML10 laserski interferometar.....	44
4. IZRADA PREDLOŽENOG SUSTAVA.....	45
5. REZULTATI	53
5.1. Mjerenje korištenjem PM100USB.....	53
5.2. Mjerenje uređajem Agilent 53181A	55
5.3. Mjerenje PCI-DAS6034 akvizicijskom karticom	56
6. ZAKLJUČAK.....	60
LITERATURA.....	61
PRILOZI.....	63

POPIS SLIKA

Slika 1.	Hrvatska mjeriteljska infrastruktura [5]	6
Slika 2.	Regionalne mjeriteljske organizacije diljem svijeta [10]	9
Slika 3.	Nazivi predmetaka, oznaka i brojčane vrijednosti [11].....	12
Slika 4.	Hijerarhija etalona i lanac sljeđivosti [10]	13
Slika 5.	Shema umjeravanja [12].....	14
Slika 6.	Michelsonov interferometar za mjerenje pomaka opremljen retroreflektorima[13]	17
Slika 7.	Primjer konstruktivne i destruktivne interferencije[14]	18
Slika 8.	Primjer nastajanja konstruktivne i destruktivne interferencije u Michelsonovom interferometru[15]	18
Slika 9.	Primjer interferencijskih linija.....	19
Slika 10.	Postav Michelsonovog interferometra za umjeravanje valne duljine[16].....	23
Slika 11.	Kowalskijev interferometar[16]	25
Slika 12.	Fabry-Perot interferometar[16]	27
Slika 13.	Fizeau interferometar[16].....	29
Slika 14.	Young-ov interferometar[16]	30
Slika 15.	HighFinesse WS-7 interferometar[20]	31
Slika 16.	Princip rada WS serije interferometara[20].....	31
Slika 17.	Bristol Instruments interferometar serije 671[21]	33
Slika 18.	Keysight technologies 86120D[22].....	35
Slika 19.	Shema idejnog koncepta postava sustava.....	36
Slika 20.	Postojeći jednoosni mjerni uređaj „Carl Zeiss“	37
Slika 21.	Thorlabs Helium-Neon Tunable Laser HTPS-EC-1	38
Slika 22.	Thorlabs-ovi moduli korišteni pri izradi interferometra.....	39
Slika 23.	Olympus LMPlanFL N mikroskopski objektiv sa 100x povećanjem	40
Slika 24.	Thorlabs PM100USB mjerač intenziteta svjetlosti i S120C fotodioda.....	41
Slika 25.	Thorlabs DET36A/M fotodetektor	42
Slika 26.	PCI-DAS6034 akvizicijska kartica	43
Slika 27.	Renishaw ML10	44
Slika 28.	Osnovni postav Michelsonovog interferometra	45
Slika 29.	Razdjelnik snopa i zrcalo	46
Slika 30.	V-stezaljka za postavljanje lasera.....	46
Slika 31.	Fotodetektor.....	47

Slika 32.	Postav modula na ploči (bez pomičnog zrcala).....	47
Slika 33.	Mikroskopski objektiv ugrađen na kućište razdjelnika snopa.....	48
Slika 34.	Konačni postav modula (bez pomičnog zrcala)	49
Slika 35.	Nepomični dio interferometra postavljen na postojeći uređaj.....	50
Slika 36.	Pomična zrcala oba interferometra ugrađena na postojeći uređaj	50
Slika 37.	Zaštita od vanjskog utjecaja svjetlosti.....	51
Slika 38.	Interferencijske linije na fotodetektoru	51
Slika 39.	Konačni postav sustava sa pripadajućom shemom	52
Slika 40.	Mjerenje pomaka uređajem PM100USB	53
Slika 41.	Agilent 53181A	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovne jedinice SI sustava [10]	11
Tablica 2. Pregled modela WS serije interferometara[20]	32
Tablica 3. Karakteristike interferometara serije 671[21]	34
Tablica 4. Karakteristike 86122C i 86120D interferometara[22]	35
Tablica 5. Specifikacije Thorlabs HeNe HTPS-EC lasera	38
Tablica 6. Popis korištenih Thorlabs-ovih modula	39
Tablica 7. Karakteristike DET36A/M fotodetektora.....	42
Tablica 8. Tehnički podaci ML10 interferometra	44
Tablica 9. Izvedene SI jedinice koje se izražavaju pomoću osnovnih SI jedinica.....	63
Tablica 10. : Izvedene SI jedinice s posebnim nazivima i znakovima.....	63
Tablica 11. Izvedene SI jedinice čiji nazivi i znakovi uključuju izvedene SI jedinice s posebnim nazivima i znakovima	64
Tablica 12. Jedinice izvan SI prihvaćene zbog njihove široke rasprostranjenosti	65
Tablica 13. Jedinice izvan SI koje se upotrebljavaju u posebnim područjima.....	65
Tablica 14. Jedinice izvan SI koje se upotrebljavaju u posebnim područjima, a čije se vrijednosti određuju eksperimentalno	65

POPIS GRAFOVA

Graf 1.	Mjerenje pomaka PM100USB 1500 točaka.....	54
Graf 2.	Mjerenje pomaka PM100USB 400 točaka (1100-1500).....	54
Graf 3.	Snimljeni signal s interferometra 1000000 uzoraka (period 5 s)	56
Graf 4.	Odsječak snimljenog signala između 200000 i 400000 uzorka (period 1s).....	56
Graf 5.	Odsječak snimljenog signala između 200000 i 210000 uzorka (period 0,05s).....	57
Graf 6.	Odsječak snimljenog signala između 200000 i 202000 uzorka (period 0,01s).....	57
Graf 7.	Odsječak snimljenog signala između 200000 i 200200 uzorka (period 0,001s)...	58
Graf 8.	Odsječak snimljenog signala u periodu od 0,001s	58

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d	nm	Pomak pomičnog kraka interferometra
λ	nm	Valna duljina
N	-	Broj registriranih interferencijskih linija
n_{air}	-	Indeks loma zraka
f_v	Pa	Vlažnost zraka izražena u parcijalnom tlaku vodene pare
σ	μm^{-1}	Valni broj u vakuumu

SAŽETAK

U današnje doba neophodno je poticati istraživanje i razvoj u području mjerenja i ispitivanja, izobrazbe i prijenosa znanja, te podići svijest o važnosti i preciznosti mjerenja i ispitivanja. Svjesnost toga je i poticaj istraživanja ovog rada; na temelju znanja stečenih u okviru studija izraditi interferencijski sustav za mjerenje valne duljine lasera s ciljem utvrđivanja valne duljine nepoznatog lasera po principu interferometrije za mjerenje pomaka.

U ovom radu dan je općeniti pregled postojećih metoda i tehnika mjerenja valnih duljina kao i nekih komercijalno dostupnih sustava, te je na temelju njih i dostupne opreme obrađena i praktično provedena ideja izrade takvog sustava.

Ključne riječi: interferometrija, akvizicija, fotodetektor, valna duljina, umjeravanje, laser

SUMMARY

Nowadays it is necessary to encourage research and development in the field of measurements and testing, training and transfer of knowledge and raise awareness of the importance and accuracy of measurements and tests. Consciousness about that is also the guiding principle of this paper; based on the knowledge gained within the study to develop an interference system for measuring wavelengths of lasers in order to determine the wavelength of an unknown laser based on the principle of displacement measuring interferometry. This paper presents a general overview of existing methods and techniques of wavelength measurement, as well as overview of some commercially available systems, and based on them and the available equipment, the practical idea of making such a system was carried out.

Key words: interferometry, acquisition, fotodetector, wavelenght, calibration, laser

1. UVOD

Pojava i potreba za mjerenjem i umjeravanjem prati se još od početaka razvoja civilizacije. O tome svjedoče otkrića o graditeljima faraonskih hramova i piramida u Egiptu oko 3.000 godina pr. Kr. koji bi smrtnom kaznom bili kažnjeni kada bi zanemarili svoju dužnost umjeravanja etalonske jedinice duljine. Njihova izvorna mjera - prvi kraljevski lakat koji je bio definiran kao duljina podlaktice od lakta do vrha ispruženog srednjaka vladajućeg faraona uvećana za širinu njegove šake, prenosila se i urezivala u crni granit te su radnici za potrebe gradnje dobivali primjerke u granitu ili drvetu, a graditelji bili odgovorni za njihovo čuvanje.

Otada su ljudi, bez obzira na mjesto i vrijeme u kojemu se mjeriteljstvo i u kojim uvjetima definiralo i razvijalo, pridavali veliku pozornost ispravnosti i ujednačavanju standarda mjerenja. Prema Mendeljejevu, nauka počinje tamo gdje počinju mjerenja, i to ne bilo kakva, već ona u koja se, jednostavno rečeno, može vjerovati.[1] Posljedicom takvog stajališta i uvjerenja znanstvene zajednice, 1799. godine u Parizu je stvoren desetični metrički sustav, pohranjivanjem dvaju etalona izrađenih od legure platine i iridija koji su predstavljali metar i kilogram, a koji su označili i početak današnjega Međunarodnog sustava jedinica (SI).

Troškovi mjerenja i vaganja u današnjoj Europi istovrijedni su iznosu od 6% bruto nacionalnoga proizvoda, te je tako mjeriteljstvo postalo vrlo bitan izvor informacija te ulazni podatak bilo koje realne kalkulacije, kao i temelj za donošenje poslovnih odluka.

Sva dobra kojima se trguje, a koja su posredno ili neposredno neophodna za nesmetano odvijanje svakodnevnog života, kupuju se po težini, veličini, jačini; mjere se voda, električna energija i toplina, prehrambena i ostala dobra široke potrošnje, materijali, proizvodi. Također se moraju precizno mjeriti vitalni znakovi života u medicini, razni uzorci biološkog materijala, djelovanje i utjecaj kemijskih ili kirurških metoda prevencije i liječenja : kako bi se, sukladno napretku u modernoj medicini, očuvalo i poboljšalo zdravlje pacijenata.

Proizvodni, trgovinski i transportni procesi su jednako ovisni o utezima i mjerama; kapetan broda koji pažljivo motri dubinu, kurs, potrošnju goriva i brzinu, inspekcije koje provode nadzor nad prehrambenim proizvodima mjere sadržaj bakterija, mjerenjima se upravlja procesima na proizvodnim linijama te namještaju alarmi čiji senzori mjere kvalitetu svakog pojedinog proizvoda. Sustavno mjerenje izlaznih podataka u proizvodnji s definiranom

tolerancijom pogreške, odnosno stupnjeva nesigurnosti jedan je od temelja industrijskog upravljanja kvalitetom, koji u većini suvremenih industrija doseže 10 – 15 % troškova proizvodnje jer upravo precizno mjerenje povećava vrijednost, učinkovitost i kvalitetu samih proizvoda.

Konačno, i znanost je potpuno ovisna o mjerenju; geolozi mjere seizmička kretanja litosfernih ploča kako bi identificirali rizična područja i predvidjeli jačinu i razornu silu potresa, astronomi mjere svjetlost s udaljenih zvijezda kako bi odredili njihovu starost, atomski fizičari pokušavaju na temelju mjerenja koja traju milijuntinke sekunde konačno potvrditi postojanje gotovo beskonačno male čestice.

Sve sfere života kao i procesi koji se odvijaju kako bi stvorili i održavali postojeće uvjete života u direktnoj su vezi s nekom od jedinica mjerenja. Gotovo je nemoguće išta opisati bez spominjanja bilo koje jedinice proizašle iz mjeriteljstva: broj sunčanih dana, broj noge, postotak alkohola u vinu, temperatura vode, tlak u cijevima ... itd.

Znanost o mjerenju – mjeriteljstvo – je vjerojatno najstarija znanost u svijetu te je znanje o tome kako se ono primjenjuje temeljna potreba u praktično svim znanstveno utemeljenim zanimanjima. Međutim, istraživanjima preciznosti, omogućavanjem veće dostupnosti i praktičnosti mjerne opreme, kao i mogućnostima njezine uporabe ovisit će smjer u kojemu će se mjeriteljstvo razvijati. Danas je neophodno poticati istraživanja i razvoj u području mjerenja i ispitivanja, izobrazbu i prijenos znanja te podizati svijest o važnosti i preciznosti mjerenja i ispitivanja. Svjesnost toga je i poticaj istraživanja ovog rada; na temelju znanja stečenih u okviru studija izraditi interferencijski sustav za umjeravanje valne duljine lasera s ciljem određivanja valne duljine nepoznatog lasera po principu interferometrije za mjerenje pomaka. Kako bi se laboratorijski eksperiment uspješno proveo, planski se definirao i praktično modelirao mjerni sustav te provelo umjeravanje i došlo do određenih zaključaka koji će biti predstavljeni u praktičnom dijelu rada.

Tom praktičnom dijelu rada prethodi kratka povijest mjeriteljstva, teorijska osnova mjeriteljstva i usko povezanih osnovnih pojmova, kao i pregled međunarodnih standarda u okviru kojih se mjeriteljstvo danas usmjerava i provodi.

1.1. Kratka povijest mjeriteljstva

U razvoju ljudske civilizacije potreba za mjerenjem javila se u dalekoj povijesti. Već se u Noino doba lakat koristio za mjerenje dužine jer je tako definirano mjerilo bilo vrlo korisno, uvijek dostupno i nije se moglo zagubiti. Osim lakta za mjerenje dužine koristili su se i ostali dijelovi ljudskog tijela kao što su: stopa, ruka, palac i dr. Na taj način otkriveni su i iznenađujući odnosi između dijelova ljudskog tijela; primjerice 1 inč (25,4 mm) jedinica koja je i danas u upotrebi u angloameričkim zemljama stvarno odgovara prosječnoj širini ljudskog palca, to je također duljina određena od vrha do prvog zgloba četvrtog prsta na ruci. Dvanaest palaca je stopa, tri stope su udaljenost od vrha čovječjeg nosa do kraja ispružene ruke itd. Tisućama godina, ljudi su na taj način mjerili kratke udaljenosti. [2]

Znanstvena istraživanja i arheološka iskopavanja pokazala su da su Babilonci prvi imali jedinstven sustav mjera propisan od vladara te posebne pramjere slične današnjima. Pramjerilo duljine (bakreni štap duljine 1103,5 mm i mase 41,5 kg) potječe iz vremena oko 2.000 godina prije Krista. Pretpostavlja se da su osim pramjerila duljine, Babilonci imali i normirane utege, što prilikom iskopavanja nije utvrđeno. Pronađeni su utezi koji su bili normirani 1.300 godina kasnije („teška mina“ iznosila je 1,0048 kg). Osim za duljinu i masu, Babilonci su imali normiranu mjeru i za volumen. To je bila srebrna vaza na kojoj je bilo ugravirano „10 sila“ što je iznosilo 4,8 dm³. [2]

Kod Egipćana i Perzijanaca kao osnovne mjere za dužinu također se susreću dijelovi ljudskog tijela (kraljevska stopa i lakat).

U Grčkoj je mjerenje spadalo pod državnu službu. Iako su Grci većinu svojih mjera preuzeli od Egipćana, oni su razvili i neke svoje vlastite mjere kao što su: atička stopa i atički stadion.

U trgovini između naroda mnoge od tih metoda mjerenja udaljenosti i težine postupno su se izmiješale i nadograđivale. Tako su Rimljani koristili grčke mjere dodajući svoj vlastiti mjerni sustav. Normirane štapove čuvali su u Kapitolu, a njihove kopije uzidavali su u javne građevine tako da su se njima mogli služiti građani. Kada su Rimski vojnici marširali oni su određivali udaljenost koju su prošli brojanjem koraka.

Kada je Rimsko Carstvo prestalo postojati, oko 600-te godine poslije Krista, Europa se našla u mraku srednjeg vijeka. Šesto ili sedamsto godina čovječanstvo je napravilo vrlo male korake u području normizacije mjerenja; u Europi je svaki grad ili veći gradić imao svoje mjere. Tako je i Dubrovačka Republika imala normiranu mjeru dužine određenu duljinom lakta (51 cm) na

Stupu viteza Orlanda. Etalon (metalni štap) čuvao se u palači Sponza, a ista duljina lakta urezana je i u kamenom postamentu Orlandova spomenika. [2]

U drugoj polovini 17. stoljeća dolazi do snažnog razvoja trgovine, obrta i znanosti. Već 1690. godine znanstvenik Isaac Newton prezentirao je svijetu nove ideje o prirodi svjetlosti. On je promatrao linije duginih boja koje okružuju dodirnu točku između konveksne površine stakla i ravne staklene ploče (Newtonovi kolobari). U stvari, Newton je otkrio vrlo preciznu metodu mjerenja, koju su kasnije drugi znanstvenici dograđivali i uspostavili novu granu znanosti nazvanu interferencija svjetlosti. [2]

I dok su znanstvenici istraživali u svojim laboratorijima, obrtnici i trgovci nisu više mogli vršiti proizvodnju i razmjenu svojih proizvoda na temelju mnoštva mjera koje su postojale te je neriješeni mjerni sustav predstavljao kočnicu daljnjem razvoju. U cilju unifikacije mjera, godine 1790., francuska Akademija pokreće projekt jedinstvenog sustava mjera. Posebna komisija najuglednijih učenjaka predložila je decimalni metrički sustav jedinica koji se oslanja na prirodne pramjere. Zakonima iz 1795. i 1799. godine ozakonjen je metrički mjerni sustav te decimalni sustav mjera zbog lakšeg preračunavanja. Osim metra uveden je kvadratni i kubični metar, jedinica za težinu (težina 1cm² čiste vode kod 4°C) i jedinica za vrijeme sekunda, kao 1/86400 - ti dio srednjeg dana. Duljina od jednog metra i masa od jednog kilograma materijalno su utjelovljene iz platine i 1799. godine pohranjene u arhivu Francuske Republike. Zbog toga su dobile naziv arhivski metar i arhivski kilogram. [2]

Razvojem znanosti, tehnologije i trgovine u mnogim zemljama javila se potreba za uvođenje jedinstvenog metarskog sustava. Tako je 1870. godine zasjedala prva Međunarodna komisija za metar s ciljem da definira mjerne jedinice zajedničke svim zemljama Europe. Slijedećim zasjedanjem Međunarodne komisije za metar objašnjen je način izrade novih metričkih pramjera, način njihove usporedbe s pariškim arhivskim pramjerama, a preporučeno je i osnivanje Međunarodnog ureda za mjere i utege. Zadatak tog ureda je čuvanje metričkih pramjera i širenje metričkog sustava jedinica u svijetu. Kao nastavak na isto, 1875. godine u Parizu je potpisan Dogovor o metru čime su postavljeni temelji mjeriteljstva u svijetu. [2]

Tim činom je postavljen temelj današnjem Međunarodnom sustavu jedinica SI koji će biti predmetom obrade u poglavlju 1.2.1.2.

1.2. Osnovni pojmovi u mjeriteljstvu

Mjeriteljstvo (metrologija), znanost o mjerenju je specijalizirani dio pojedinih prirodnih i tehničkih znanosti koji se bavi metodama mjerenja fizikalnih veličina, razvojem i izradom mjernih uređaja, reprodukcijom i pohranjivanjem mjernih jedinica, te svim ostalim aktivnostima koje omogućavaju mjerenje i usavršavanje mjernih postupaka. Mjerenje tako predstavlja skup aktivnosti čiji je cilj dobivanje vrijednosti mjerne veličine (fizičke veličine). Vrijednost mjerene veličine dobiva se uspoređivanjem određene materije, pojave ili predmeta sa predmetom, pojavom ili materijalom istorodne veličine s time da se prilikom mjerenja u tehnici određenoj karakteristici pridružuju brojne vrijednosti. [3]

Kako mjerenja nisu savršena zbog djelovanja slučajnih utjecaja (tzv. slučajne pogreške) i zbog ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja (tzv. sustavne pogreške), mjerni rezultat je samo aproksimacija ili približna procjena vrijednosti mjerene veličine. [1]

Nedostatak znanja o utjecajnim veličinama, promjene rezultata u uvjetima ponovljivosti ili obnovljivosti te nesigurnost pridružena matematičkim modelima doprinose su nesigurnosti mjernog rezultata, odnosno sumnju u valjanost mjernog rezultata.

Mjeriteljstvo tome nastoji doskočiti objedinjavanjem svih teoretskih i praktičnih aspekata mjerenja bez obzira na njihovu mjernu nesigurnost i područje primjene u cilju dobivanja usporedivih, točnih i pouzdanih mjernih rezultata.

Mjerno jedinstvo tako postaje cilj mjeriteljstva, a da bi se isti u realnim okvirima ostvarivao, sve mjeriteljske sustave potrebno je moći opisati i kvantificirati, nekada samo matematičkim, a danas, poželjno, i vrlo dostupnim statističkim parametrima, modelima i alatima.

1.2.1. Načelo mjernog jedinstva u mjeriteljstvu

Mjerno jedinstvo je stanje kada se rezultati mjerenja, izraženi u zakonitim jedinicama, mogu s utvrđenim mjernim nesigurnostima dovesti u vezu s referentnim etalonima. [1]

Pretpostavka za uspostavljanje mjernog jedinstva je postojanje mjeriteljske infrastrukture, poznavanje i upotreba međunarodnog sustava jedinica SI, promatranje rezultata mjerenja u odnosu na referentnu vrijednost - etalon te provođenje umjeravanja do razine sljedivosti rezultata mjerenja.

1.2.1.1. Mjeriteljska infrastruktura

Mjeriteljska infrastruktura je organizacijski temelj mjeriteljstva. Ona se u većini zemalja sastoji od nacionalnih mjeriteljskih institucija (NMI), imenovanih nacionalnih laboratorija i ovlaštenih laboratorija pri čemu se teži da oni budu imenovani akreditacijom, potvrđivanjem ili ocjenjivanjem od njima ravnopravnih stručnjaka. NMI je skup institucija koje su odlukom države određene za razvijanje i održavanje nacionalnih etalona jedne ili više veličina sa zadatkom provoditi potrebna istraživanja za unapređenje mjernih uređaja i mjernih metoda, obavljati umjeravanje najpreciznijih laboratorijskih mjernih uređaja, surađivati u donošenju prijedloga zakonodavnih akata s područja cjelokupne metrologije, uz dozvolu države kontrolirati provođenje zakona i uredbi koje se odnose na metrologiju, te u ime države sudjelovati u radu međunarodnih metroloških organizacija. [4]

Kao primjer nacionalne mjeriteljske infrastrukture navodi se Hrvatska mjeriteljska infrastruktura čije su sastavnice Hrvatski zavod za norme (HZN), Državni zavod za mjeriteljstvo (DZM), Državni mjeriteljski institut i Hrvatska akreditacijska agencija (HAA).



Slika 1. Hrvatska mjeriteljska infrastruktura [5]

Hrvatski Državni zavod za mjeriteljstvo je pridruženi član Opće konferencije za utege i mjere (CGPM), potpisnik je sporazuma o međusobnom priznavanju nacionalnih mjernih etalona te potvrda o mjerenju i umjeravanju (CIPM MRA), član Međunarodne organizacije za zakonsko mjeriteljstvo (OIML) te je član Europske udruge nacionalnih mjeriteljskih instituta (EUROMET), i pridruženi član Europske suradnje u zakonskom mjeriteljstvu (WELMEC).

Složenija organizacija mjeriteljskih ustanova i laboratorija povezana još raznim skupštinama, uredima, biroima, savjetodavnim tijelima se nastavlja do europske i svjetske razine čineći tako regionalnu i međunarodnu mjeriteljsku infrastrukturu.

Kamen temeljac međunarodne mjeriteljske infrastrukture je svakako Konvencija o metru. Potpisivanjem Konvencije o metru koja danas broji pedesetak zemalja članica je definirano:

- jedinica dužine metar i jedinica mase kilogram u obliku materijalnih pramjera,
- osnovan je Međunarodni ured/biro za utege i mjere (Bureau International des poids et Mesures - BIPM) kao stalni znanstveni zavod Konvencije o metru,
- osnovan je Međunarodni komitet za utege i mjere (Comité International des Poids et Mesures – CIPM) sa zadatkom da upravlja znanstvenim i tehničkim radom Međunarodnog ureda za mjere i utege u duhu Konvencije o metru, te
- dogovoreno je da se najmanje jednom u svakih 6 godina u Parizu sazove Generalna konferencija za mjere i utege (Conférence Générale des Poids et Mesures - CGPM), tj. skupština ovlaštenih predstavnika zemalja članica Konvencije o metru. [6]

U okviru CIPM je osnovano i nekoliko Savjetodavnih odbora (CC) čiji je cilj okupljanje eminentnih svjetskih stručnjaka u svojim područjima koji služe kao savjetnici za znanstvena i tehnička pitanja u segmentu: CCAUV za akustiku, ultrazvuk i vibracije, CCEM CC za elektricitet i magnetizam, CCPR CC za fotometriju i radiometriju, CCT CC za termometriju, CCL CC za duljinu, CCTF CC za vrijeme i frekvenciju, CCRI CC za ionizacijsko zračenje, CCU CC za jedinice, CCM CC za masu i srodne veličine, CCQM CC za količinu tvari. [6]

Zanimljivim je pritom napomenuti da su na čelu Međunarodnog komiteta (CIPM) i Međunarodnog ureda za mjere i utege bili su najpoznatiji znanstvenici pojedinih razdoblja, čija dostignuća predstavljaju danas temelje znanosti: D.I. Mendeljejev, A.A. Michelson, V. Voltera itd., dok su neki čak i dobitnici Nobelove nagrade: Ch.Ed. Guillaume, P. Zeeman, Louis de Broglie, Manne, Siegbahn...

Razvoj regionalne mjeriteljske infrastrukture se pak naslanja na Dogovor o uzajamnom priznavanju (Mutual Recognition Arrangement - MRA) nacionalnih mjernih standarda i certifikata za umjeravanje i mjerenje kojeg su na sastanku održanom u Parizu 1999. godine potpisali direktori nacionalnih metroloških instituta (NMI) trideset i osam članica država Konvencije o metru i predstavnici dviju međunarodnih organizacija. Dogovor o uzajamnom

priznavanju je rezultat sve veće potrebe za otvorenom, transparentnom i sveobuhvatnom metodom koja daje korisnicima pouzdane kvantitativne informacije o usporedbi nacionalnih metroloških usluga i koja osigurava tehničku bazu za šire sporazume dogovorene za međunarodnu trgovinu, komercijalne i svakodnevne poslove. [7]

Uz gore navedene međunarodne i regionalne mjeriteljske organizacije, postoji još niz ostalih međuvladinih organizacija koje s istima imaju potpisane međunarodne sporazume i koje se navode u nastavku.

EURAMET

European Metrology Collaboration

- glavna organizacija za metrologiju u Europi i oslonac europske komisije koji upravlja projektima EU od interesa za tržište

COOMET

Cooperation Metrologique

- organizacija u koju su uključeni nacionalni metrološki instituti 12 zemalja istočne i centralne Europe da bi ustrojili i izgradili funkcionalni metrički sistem i uspostavili mostove sa Zapadom. Ona se bavi – kao i prethodna organizacija EURAMET – usporedbom lanca etalona (primarnih, sekundarnih i radnih)

EA

European Cooperation for Accreditation

- ključna organizacija akreditacijskih tijela u EU koja uključuje 15 nacionalnih tijela za akreditaciju u namjeri da ispitivanja i umjeravanja koje provodi u laboratorij u nekoj zemlji članici budu prihvaćeni i priznati od države i industrije u svim ostalim zemljama članicama

EAURACHEM

udruženje europskih laboratorija za analitičku kemiju koje surađuje sa EURAMET-om u smislu uspostavljanja referentnih laboratorija, primjene certificiranih referentnih materijala i sljedivosti prema jedinici mol

EUROLab

udruženje organizacija nacionalnih laboratorija koje obuhvaća preko 2000 laboratorija te koje putem koordiniranih aktivnosti, raznih radionica, seminara i izdavanja pisanih materijala predstavlja i promovira organizacije laboratorija u tehničkom i političkom smislu te usmjerava zaključke prema npr. Europskoj komisiji, Europskoj standardizaciji i međunarodnim odnosima

WELMEC

Western European Legal Metrology Cooperation

- Europska organizacija za zakonsku metrologiju je organizacija nacionalnih organa za zakonsku metrologiju zemalja članica EU i EFTA te pridruženih članova nacionalnih mjeriteljskih organa zemalja u procesu tranzicije za članstvo u EU. Osnovni cilj WELMEC-a je razvijanje međusobnog povjerenja među zakonskim mjeriteljskim organima Europe, harmonizacija aktivnosti zakonskog mjeriteljstva i poticanje razmjene informacija između zainteresiranih strana

ISO

International Organization for Standardization

- Međunarodna organizacija za standardizaciju je međunarodno tijelo za donošenje industrijskih i komercijalnih normi sastavljeno od predstavnika raznih nacionalnih normizacijskih tijela (162 člana od kojih svaki predstavlja jednu zemlju). Iako se ISO definira kao nevladina organizacija, njegova jačina kod donošenja norma se često očituje kroz zakonska usvajanja samih normi, bilo kroz međunarodne ugovore ili kroz nacionalne norme, što ga čini moćnijim od većine nevladinih organizacija

OIML

Organisation Internationale de Métrologie Légale

- Međunarodna organizacija za zakonsku metrologiju je međuvladina ugovorna organizacija u čije se članstvo uključuju države članice, zemlje koje učestvuju aktivno u tehničkim aktivnostima te dopisni članovi, zemlje koje se udružuju sa OIML-om kao promatrači.
- Poput Konvencije o metru koja ima organizirane međunarodne urede/biroe/komitee, tako i OIML ima krovni organ - Međunarodnu konferenciju za zakonsku metrologiju koja se sastaje jednom u četiri godine, rukovodeći organ - Međunarodni komitet za zakonsku metrologiju (Comité International de Métrologie Légale, CIML), koji se sastoji od po jednog predstavnika svake učlanjene države i koji se sastaju barem jednom godišnje i izvršni organ - Međunarodni ured za zakonsku metrologiju (Bureau International de Métrologie Légale, BIPM) čiji je zadatak stvaranje dokumentacijskog centra, koordinacija radova stručnih sekretarijata, Tehničkih komiteta i podkomiteta, Razvojnog vijeća OIML-uloga, pripremanje zasjedanja Komiteta i Konferencije itd. Zadatak OIML – a je razvoj modela propisa i izdavanje međunarodnih preporuka i smjernica, koje osiguravaju članicama osnovu za uspostavljanje nacionalnih zakonodavstava kod različitih kategorija mjernih instrumenata.
- Za prenošenje smjernica organiziraju seminare kojima je cilj ubrzati napredovanje u korištenju mjerenja i metroloških postupaka kako bi osigurali koristi za državu, kao i razmjenu u industriji. Suradjući sa više od 100 međunarodnih i regionalnih institucija u aktivnostima u metrologiji i standardizaciji, OIML-ov rad predstavlja globalnu suradnju s ciljem unaprjeđenja pouzdanosti mjerenja

Međusobna raširenost i međudjelovanje organizacija koje definiraju mjeriteljstvo može se popratiti na slijedećoj slici.



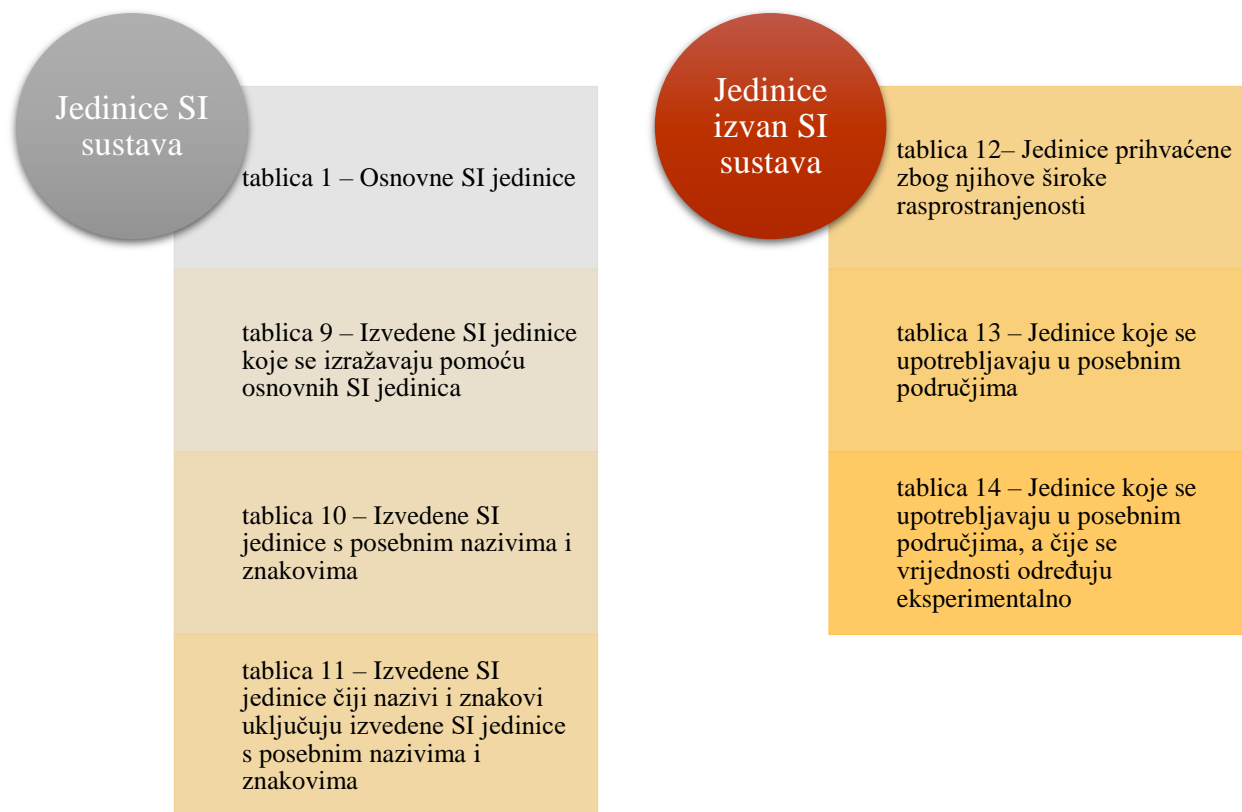
Slika 2. Regionalne mjeriteljske organizacije diljem svijeta [10]

1.2.1.2. Međunarodni sustav jedinica SI

Ideja o metričkome sustavu (sustavu jedinica koji se temelji na metru i kilogramu) pojavila se tijekom Francuske revolucije kad su 1799. godine izrađena i pohranjena u Francuskome nacionalnom arhivu u Parizu dva platinska referentna etalona za metar i kilogram (koji su kasnije nazvani arhivskim metrom i arhivskim kilogramom). Nacionalna skupština povjerala je Francuskoj akademiji znanosti izradu nacрта novog sustava jedinica za uporabu u cijelom svijetu, a 1946. godine zemlje članice Dogovora o metru prihvatile su MKSA (metar, kilogram, sekunda, amper) sustav.

Godine 1954. MKSA sustav proširen je kako bi uključivao i kelvin i kandelu te je nakon toga sustav dobio ime Međunarodni sustav jedinica (Le Système International d'Unités) (SI).

Na 14. generalnoj konferenciji za utege i mjere ponovno je proširen dodavanjem mola kao osnovne jedinice za količinu tvari, čime SI sustav danas, obuhvaćajući sedam osnovnih jedinica [Tablica 1], zajedno s izvedenim jedinicama [Tablica 9, Tablica 10, Tablica 11] u prilogu, čini suvisao sustav jedinica. Osim toga, za uporabu sa SI jedinicama, prihvaćene su i određene druge, jedinice izvan SI sustava, čiji se pregled dostavlja kroz [Tablica 12, Tablica 13, Tablica 14] u prilogu rada, a u nastavku njihova podjela i organizacija.[10]



Tablica 1. Osnovne jedinice SI sustava [10]

Osnovna veličina	Osnovna jedinica	Definicija	Oznaka
duljina	metar	duljina puta koji u vakuumu prijeđe svjetlost u vremenskome odsječku od 1/299 792 458 sekunde	m
masa	kilogram	jednak masi međunarodne pramjere kilograma	kg
vrijeme	sekunda	trajanje od 9 192 631 770 perioda zračenja koje odgovara prijelazu između dviju hiperfinskih razina osnovnog stanja cezijeve atoma 133.	s
električna struja	amper	stalna struja koja bi, kad bi se održavala u dva ravna usporedna vodiča neizmjerne duljine i zanemariva kružnoga poprečnoga presjeka postavljena u vakuumu na međusobnoj udaljenosti od 1 m, proizvodila između tih vodiča silu jednaku 2×10^{-7} njutna po metru duljine	A
termodinamička temperatura	kelvin	dio 1/273,16 termodinamičke temperature trojne točke vode	K
količina tvari	mol	količina tvari u sustavu koji sadrži onoliko elementarnih jedinka koliko ima atoma u 0,012 kilograma ugljika 12. Kada se upotrebljava i mol, moraju se navesti elementarne jedinice, koje mogu biti atomi, molekule, ioni, elektroni, druge čestice, ili zadane skupine takvih čestica	mol
svjetlosna jakost	kandela	je svjetlosna jakost izvora koji u danome smjeru zrači jednobojno zračenje frekvencije 540×10^{12} herca i koji ima jakost zračenja u tome smjeru od 1/683 vata po steradianu	Cd

Obzirom da u mjeriteljstvu vrijednosti koji se dobiju kao rezultat mjerenja mogu biti i značajno manje ili značajno veće od koherentne jedinice, na konferencijama CGPM je usvojen niz prefiksni imena i simbola - predmetaka decimalnih višekratnika i djelitelja koji su navedeni na sljedećoj slici.

<u>Faktor</u>			<u>Prefiks</u>	<u>Simbol</u>
1 000 000 000 000 000 000	=10 ¹⁸	kvintilijun	exa	E
1000 000 000 000 000	=10 ¹⁵	kvadrilijun	penta	P
1000 000 000 000	=10 ¹²	bilijun	tera	T
1000 000 000	=10 ⁹	milijarda	giga	G
1 000 000	=10 ⁶	milijun	mega	M
1000	=10 ³	tisuću	kilo	k
100	=10 ²	sto	hekto	h
10	=10 ¹	deset	deka	da
0,1	=10 ⁻¹	desetinka	deci	d
0,01	=10 ⁻²	stotinka	centi	c
0,001	=10 ⁻³	tisućinka	mili	m
0,000 001	=10 ⁻⁶	milijuntinka	mikro	μ
0,000 000 001	=10 ⁻⁹	milijardinka	nano	n
0,000 000 000 001	=10 ⁻¹²	bilijuntinka	piko	p
0,000 000 000 000 001	=10 ⁻¹⁵	kvadrilijuntinka	femto	f
0,000 000 000 000 000 001	=10 ⁻¹⁸	kvintilijuntinka	ato	a

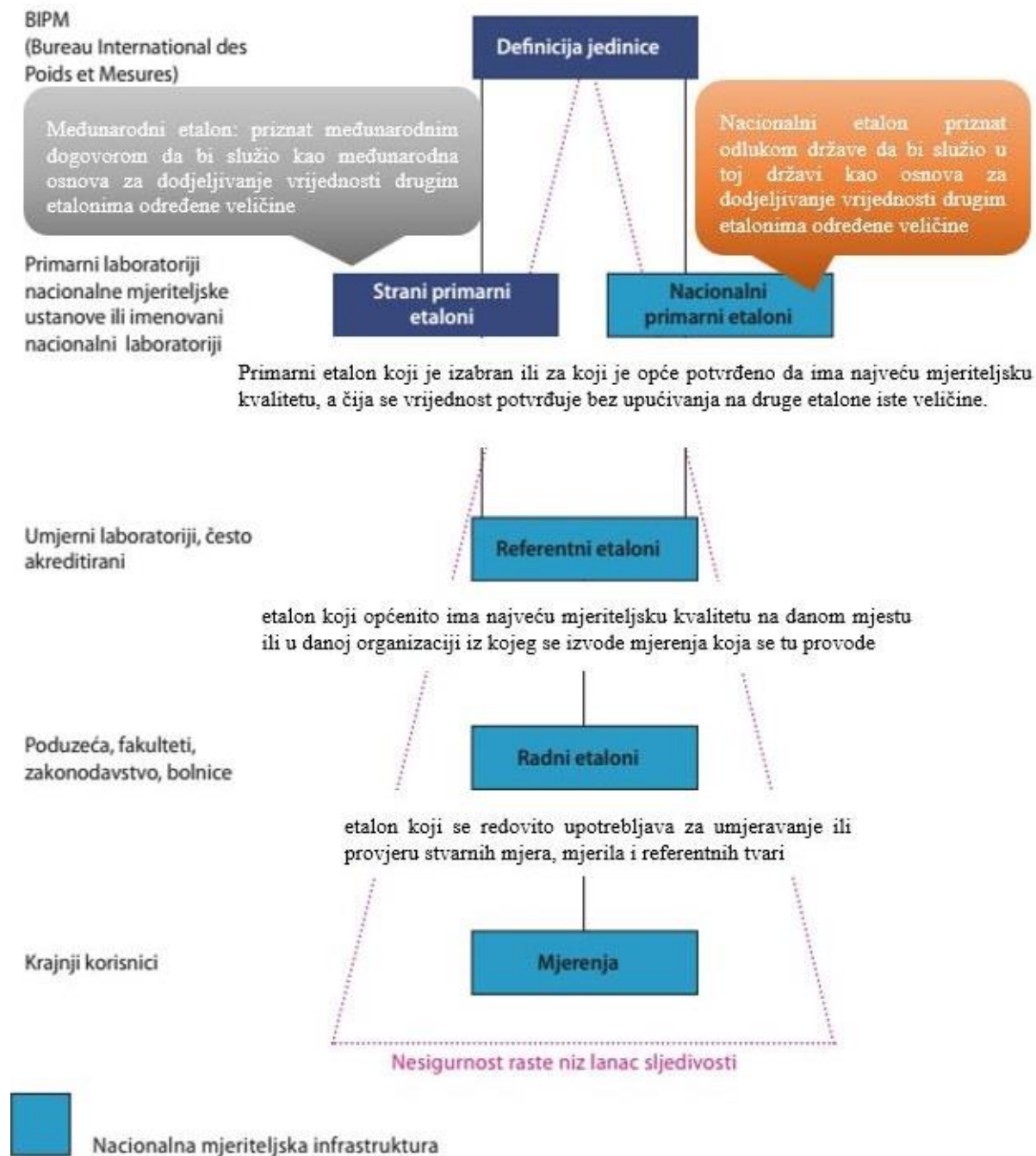
Slika 3. Nazivi predmetaka, oznaka i brojčane vrijednosti [11]

Decimalne jedinice tvore se od svih jedinica SI, izuzev stupnja Celzijeva i kilograma (da se ne bi primijenila po dva predmetka, decimalne jedinice mase tvore se od jedinice gram, $g = 0.001$ kg), te od sljedećih, iznimno dozvoljenih, jedinica izvan SI sustava: litra, tona, bar, elektrovolt i var.

Danas je u većini država upotreba međunarodnog sustava jedinica (SI) zakonski propisana (osim SAD-a, Liberije), a u Hrvatskoj je Međunarodni sustav uveden u uporabu 1. siječnja 1981., čime su neke do tada korištene jedinice postale nezakonite.

1.2.1.3. Etalon

Mjerni etalon je stvarna mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti neke veličine kako bi mogao poslužiti kao referenca. Etalon je ostvarenje definicije dane veličine s iskazanom vrijednošću veličine i mjerne nesigurnosti.



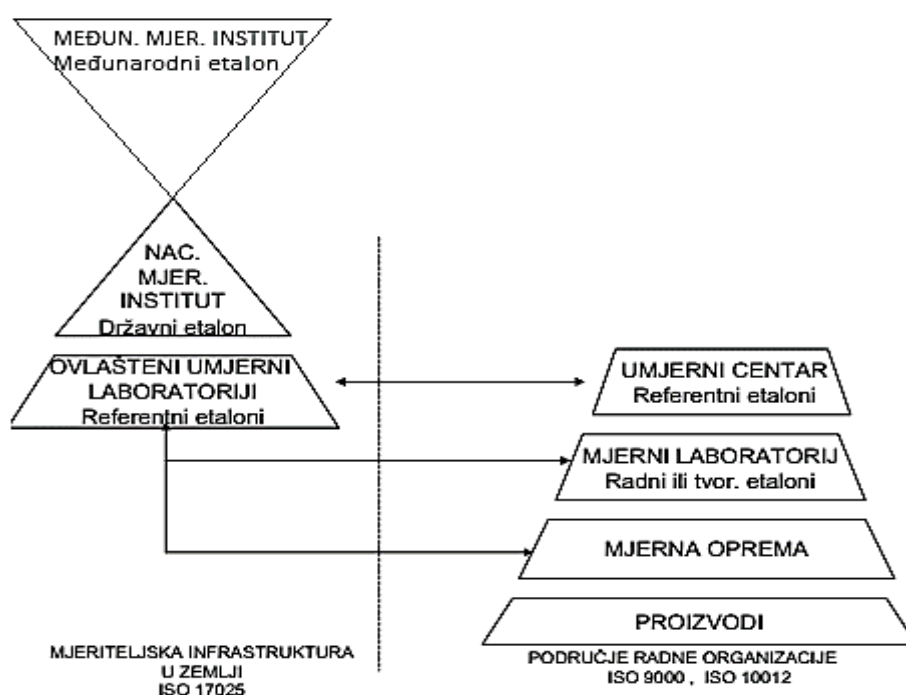
Slika 4. Hijerarhija etalona i lanac sljedivosti [10]

1.2.1.4. Umjeravanje i sljedivost

Umjeravanje je skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje pokazuje neka materijalizirana mjera ili neka referentne tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima.[12]

Glavni razlozi za umjeravanje mjerila su: uspostavljanje i prikaz sljedivosti, osiguravanje da očitavanja mjerila budu sukladna s drugim mjerenjima, određivanje točnosti očitavanja mjerila, te utvrđivanje pouzdanost mjerila, tj. može li mu se vjerovati. .[10]

Umjeravanje mjerila, mjernog sustava ili referentne tvari ujedno je i temeljno oruđe za osiguravanje mjerne sljedivosti. Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata kojim se rezultat dovodi u vezu s navedenim referentnim etalonima (državnim ili međunarodnim) korištenjem neprekinutih lanaca umjeravanja od kojih svako umjeravanje doprinosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. Lanac sljedivosti je neprekidan lanac usporedaba, od kojih svaka ima utvrđenu mjernu nesigurnost čime se osigurava da mjerni rezultat ili vrijednost etalona bude povezana s referentnim etalonima na višoj razini.



Slika 5. Shema umjeravanja [12]

1.2.2. Kategorije u mjeriteljstvu

U Europskoj Uniji mjeriteljstvo se dijeli na 4 kategorije s različitim razinama složenosti i točnosti:

1. Znanstveno mjeriteljstvo je dio mjeriteljstva koji se bavi problemima koji su zajednički za sva mjeriteljska pitanja bez obzira na mjerenu veličinu. Ono obuhvaća opće, teoretske i praktične probleme koji se tiču mjernih jedinica, uključujući njihova ostvarenja i njihovo prenošenje znanstvenim metodama, probleme mjernih pogrešaka i nesigurnosti te probleme mjeriteljskih svojstava mjerila. Prema BIPM-u se znanstveno mjeriteljstvo dijeli u 9 tehničkih područja: masa, elektricitet, duljina, vrijeme i frekvencija, termometrija, ionizacijsko zračenje i radioaktivnost, fotometrija i radiometrija, protok, akustika i količina tvari. [2]
2. Industrijsko mjeriteljstvo se bavi mjerenjima u proizvodnji i upravljanju kvalitetom kroz postupke umjeravanja, razdoblja umjeravanja, upravljanje mjernim procesima i upravljanje mjerilima i industriji kako bi se osiguralo da ona budu u skladu sa zahtjevima za njihovu predviđenu uporabu. [5]
3. Zakonsko mjeriteljstvo je dio mjeriteljstva uređen zakonom i drugim propisima u cilju uspostave povjerenja u rezultate mjerenja u području primjene zakonitih mjerenja. Odnosi se na djelatnosti koje su rezultat zahtjeva iz propisa kao što su mjerenja, mjerne jedinice, mjerila i mjerne metode koje provode mjerodavna tijela. Glavni cilj zakonskog mjeriteljstva je zaštita građana od posljedica pogrešnih mjerenja kako u službenim i trgovačkim poslovima tako i u radnom okolišu, zaštiti na radu i sigurnosti. Drugim riječima tehnička funkcija zakonskog mjeriteljstva je osigurati da mjerila jamče ispravne mjerne rezultate u danim radnim uvjetima, u cjelokupnom razdoblju uporabe te u granicama dopuštenih odstupanja. [2]
4. Ne postoji međunarodno prihvaćena definicija temeljnog mjeriteljstva, ali ona označava najvišu razinu točnosti u danome području. Temeljno se mjeriteljstvo može, prema tomu, opisati kao najviša grana znanstvenog mjeriteljstva. [2]

2. INTERFEROMETRIJA

Interferometrija je metoda mjerenja koja koristi fenomen interferencije valova (obično svjetlosnih, radio ili zvučnih valova). Mjerenja mogu uključivati određene karakteristike samih valova i materijala s kojima su valovi u interakciji. Uz navedeno, interferometrija se koristi kao tehnika koja koristi svjetlosne valove za proučavanje promjena u pomaku. Ta tehnika mjerenja pomaka opsežno se koristi za mjerenje i umjeravanje uređaja za upravljanje pomakom kod alatnih strojeva za preciznu strojnu obradu.

Upotrebom dviju svjetlosnih zraka (obično podijelivši jedno svjetlo na dva) može se formirati uzorak interferencije kada se te dvije zrake superponiraju. Budući da je valna duljina vidljive svjetlosti vrlo kratka, mogu se otkriti male promjene razlika u optičkim putevima između dvije zrake svjetlosti (budući da će te razlike izazvati zamjetne promjene u uzorku smetnji). Stoga je optička interferometrija vrijedna mjerna tehnika već više od stotinu godina. Njezina točnost kasnije je poboljšana izumom lasera.

Prvu demonstraciju korištenja principa svjetlosne interferencije kao alata za mjerenje uspješno je izveo Albert A. Michelson 1880-ih razvojem prvog interferometra. Iako se tehnologija i preciznost mjerenja razvila tokom godina, osnovni princip rada Michelsonovog interferometra i dalje je ostao kao temelj interferometrije.

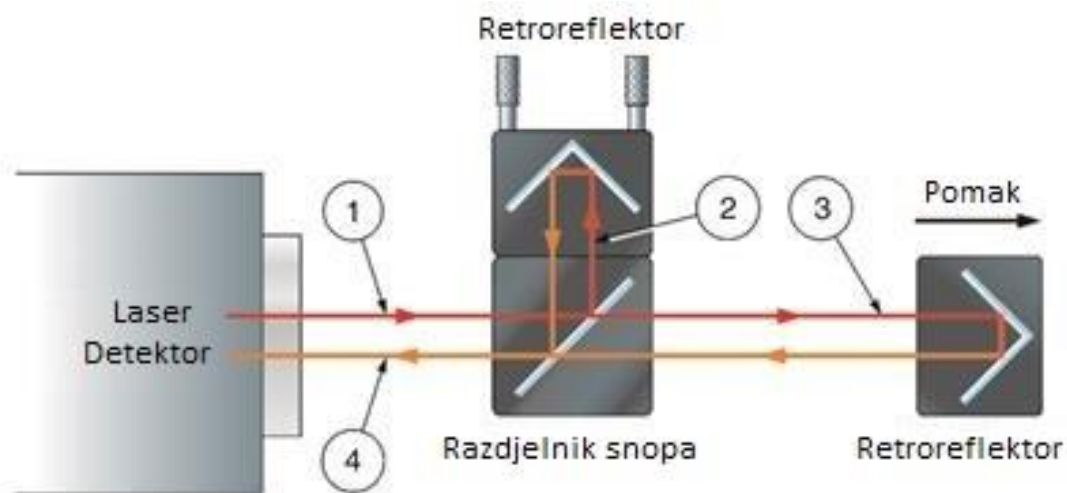
Michelsonov interferometar sastoji se od razdjelnika snopa svjetlosti (eng. beamsplitter) i dva zrcala. Kada svjetlost prođe kroz razdjelnik snopa (koji djelomično reflektira), podijeli se u dva snopa s različitim optičkim putevima (jedan prema zrcalu 1, a drugi prema zrcalu 2). Nakon što se reflektiraju sa zrcala, snopovi se ponovo spoje na razdjelniku snopa prije dolaska na detektor. Razlika u putevima ovih dvaju snopova uzrokuje faznu razliku koja stvara interferencijski uzorak. Taj uzorak se zatim analizira na detektoru kako bi se procijenila karakteristika vala, svojstava materijala ili pomicanje jednog od zrcala (ovisno o tome za što se koristi mjerenje interferometrom).[13]

2.1. Princip rada interferometra za mjerenje pomaka

Postoje različite interferometrijske postavke temeljene na Michelsonovom principu, međutim, linearni postav je najjednostavniji tip prikazan na slici[Slika 6].

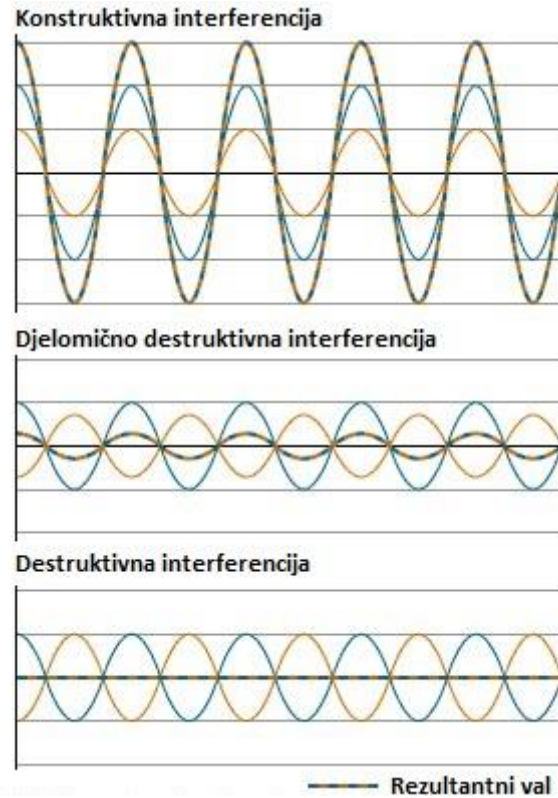
Kako bi se stvorio uzorak interferencije s velikom preciznošću (izraženom interferencijom), vrlo je važno imati izvor stabilne valne duljine, koji se postiže pomoću lasera.

U laserskom sustavu dva zrcala (upotrijebljena u Michelsonovom interferometru) su retroreflektori (prizme koji reflektiraju incidentnu svjetlost u smjeru paralelnom smjeru iz kojeg je došla). Jedan od njih je pričvršćen za razdjeljivač zraka koji tvori referentnu ruku, dok drugi retroreflektor stvara ruku za mjerenje dužine promjenjive duljine, budući da njegova udaljenost varira u odnosu na razdjelnik zraka.



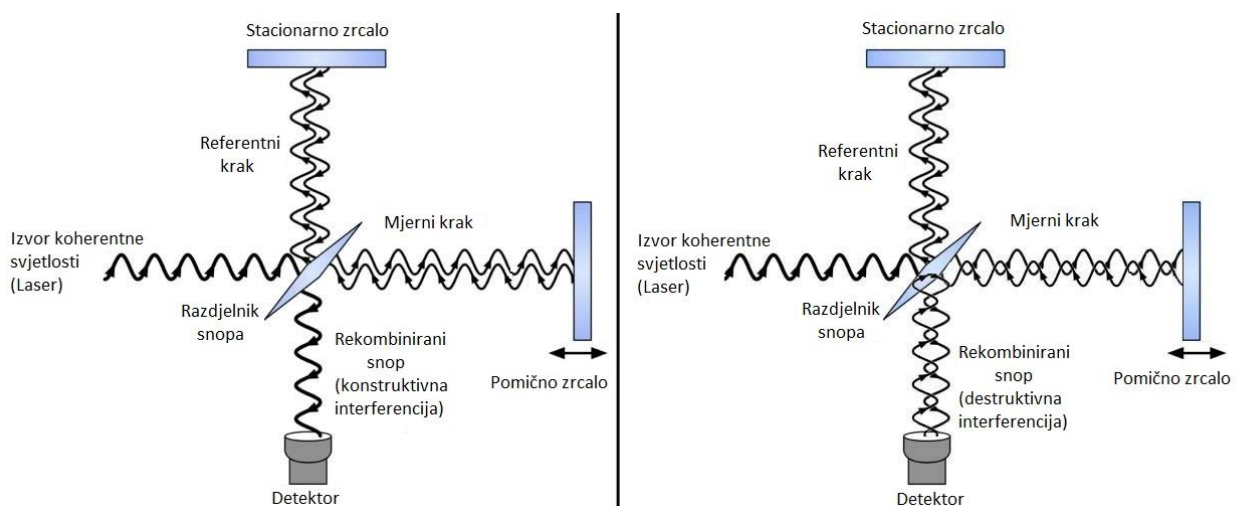
Slika 6. Michelsonov interferometar za mjerenje pomaka opremljen retroreflektorima[13]

Laserska zraka (1) izlazi iz laserske glave i biva podijeljena na dva snopa (reflektirani (2) i preneseni (3)) na polarizirajućem razdjelniku snopa. Ovi se snopovi odbijaju od dva retroreflektora i recombinišu se na razdjelniku snopa prije nego što dođu do detektora. Upotreba retroreflektora osigurava da snopovi koje dolaze iz referentnih i mjernih krakova paralelni kada se međusobno recombinišu na razdjelniku snopa. Recombinišani snopovi dopiru do detektora gdje se međusobno interferiraju konstruktivno ili destruktivno. Tijekom konstruktivne interferencije dva su snopa u amplitudnoj fazi, a vrhovi amplituda obaju snopova se međusobno pojačavaju, rezultirajući svijetlom linijom, dok su tijekom destruktivnih interferencija amplitude valnih duljina snopova izvan faze, te brjegovu amplituda jednog snopa poništavaju se dolinama amplituda drugog snopa što rezultira tamnim resama.



Slika 7. Primjer konstruktivne i destruktivne interferencije[14]

Obradom optičkog signala u detektoru možemo promatrati interferenciju tih dvaju snopova. Pomicanje mjernog kraka uzrokuje promjenu u relativnoj fazi dvaju snopova.

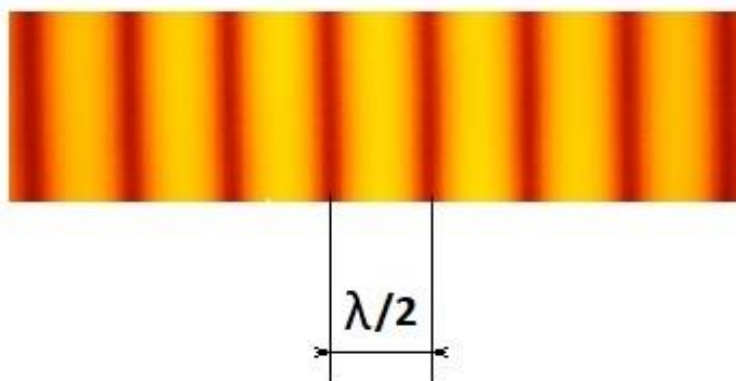


Slika 8. Primjer nastajanja konstruktivne i destruktivne interferencije u Michelsonovom interferometru[15]

Taj ciklus destruktivne i konstruktivne interferencije uzrokuje da intenzitet rekombinirane svjetlosti ciklički varira. Jedan ciklus varijacije intenziteta svjetlosti do tame do svjetlosti pojavljuje se svaki put kada se mjerna ruka (zrcalo) pomakne za pola valne duljine lasera (budući da ovaj pomak uzrokuje promjenu optičkog puta od jedne valne duljine lasera). Stoga se kretanje mjeri izračunavanjem broja ciklusa pomoću sljedeće formule(1):

$$d = \frac{\lambda N}{2} \quad (1)$$

Gdje d je pomak (nm), λ je valna duljina lasera (nm), a N je broj registriranih resica.



Slika 9. Primjer interferencijskih linija

Bez obzira koliko je dobra laserska jedinica (tj. Koliko je točna i "stabilna") točnost linearnih položajnih mjerenja ovisi o točnosti kojoj je poznata valna duljina laserskog snopa. Operativna valna duljina laserskog snopa ovisi o indeksu refrakcije zraka kroz koji prolazi, a to se mijenja s temperaturom zraka, tlakom zraka i relativnom vlagom. Stoga se valna duljina snopa treba mijenjati (kompenzirati) da uključi bilo kakve promjene u tim parametrima. Edlenova jednadžba za računanje indeksa loma zraka dana je izrazom(2):

$$n_{air} = 1 + \frac{p(n_1 - 1)_s(1 + 10^{-8}(0,601 - 0,00972t)p)}{96095,43(1 + 0,0036610t)} - f_v(3,7345 - 0,0401\sigma^2)10^{-10}$$

gdje je:

$$(n_{air} - 1)_s = (8342,54 + \frac{2406147}{130 - \sigma^2} + \frac{15998}{38,9 - \sigma^2})10^{-8}$$

$$\sigma = \frac{1}{\lambda}$$

(2)

$(n_{air} - 1)_s$ - tzv. formula disperzije zraka koja povezuje vrijednost indeksa loma s promjenom valne duljine

gdje je:

σ - valni broj u vakuumu u μm^{-1}

f_v - vlažnost zraka izražena u parcijalnom tlaku vodene pare u Pa

2.2. Princip rada interferencijskih sustava za umjeravanje valnih duljina

Poznavanje valne duljine lasera je osnovna informacija u većini primjena ovog izvora svjetlosti. Prvi pregled mjerenja duljine laserskog vala predstavili su 1977. Solomakha i Toropov.[17] Od tada, polje je strahovito naraslo. Dostupan je veliki broj metoda i tehnika mjerenja valnih duljina svjetlosti, a cjelovit pregled bi zahtijevao desetke stranica. Ovdje ćemo prikazati samo kratki pregled nekih od metoda i tehnika.

Možemo razlikovati sljedeće tri opće skupine metoda s obzirom na fizičke fenomene na kojima se baziraju:

- komparatore interferencije, **Optical beating** i metode koje koriste specifična svojstva materijala osjetljivih na valne duljine.

Prva grupa metoda mjerenja valne duljine interferencijom bazirana je na analizi faze interferencijskih linija referentnog i testiranog lasera prilikom promjene duljine optičkog puta u interferometru.

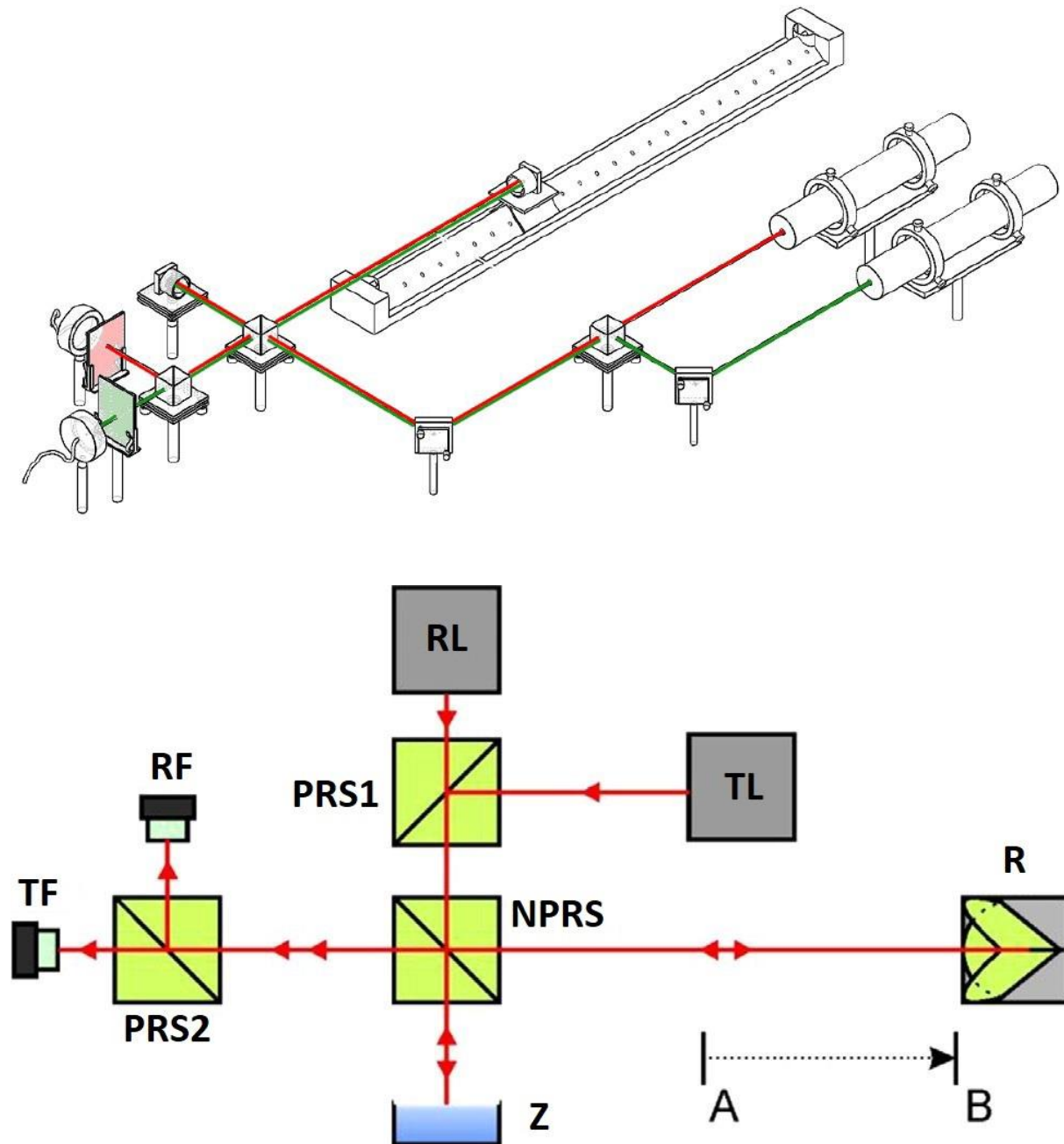
Druga grupa metoda mjerenja valne duljine interferencijom bazirana je na analizi perioda interferencijskih linija koristeći Fabry-Perot ili Fizeau interferometre. Valna duljina određuje se usporedbom perioda interferencijskih linija referentnog i testiranog lasera. Nekom od tih metoda moguće je odrediti valnu duljinu i bez uporabe referentnog lasera.[16]

2.2.1. Interferencijske metode bazirane na analizi faza interferencijskih linija

Ove metode mjerenja se baziraju na usporedbi broja prebrojanih interferencijskih linija uslijed promijene optičkog puta snopa referentnog i testiranog lasera, te na osnovi poznate valne duljine određuju nepoznatu.

Među metodama mjerenja valnih duljina baziranih na analizi faze interferencijskih linija nastalih u interferometru, najčešći su mjerni sustavi koji koriste Michelsonov tip interferometra s zrcalima, također koriste se i Kowalski-ev te Mack-Zehnder-ov interferometar.

Princip rada se bazira na simultanom uvođenju zrake referentnog i testiranog lasera u interferometar te promatranjem faze nastalih interferencijskih linija. Promjenom duljine optičkog puta u interferometru može se promatrati i promjena u fazi interferencijskih linija referentnog i testiranog lasera koja je u direktno proporcionalnoj vezi sa valnom duljinom, gdje je valna duljina referentnog lasera, te promatrana promjena u fazi interferencijskih linija osnova za izračunavanje valne duljine testiranog lasera.

2.2.1.1. *Lambdametar na osnovi Michelsonovog interferometra*

Slika 10. Postav Michelsonovog interferometra za umjeravanje valne duljine[16]

Osnovni sustav ove vrste prikazan je na slici [Slika 10]. Snopovi referentnog lasera (RL), i testiranog lasera (TL), uvode se u interferometar pomoću polariziranih razdjelnika snopa PRS1. Polaritet snopa referentnog i testiranog lasera međusobno je okomit. Nakon PRS1 snop RL i TL prolazi kroz nepolarizirani razdjelnik snopa NPRS, prolaskom kroz koji snop se dijeli na

dva kraka, referentni krak prema zrcalu Z i pomični krak prema retroreflektoru R. Umjesto ravnog zrcala na pomičnom kraku interferometra poželjno je koristiti retroreflektor kako bi se smanjila osjetljivost sustava na nesavršenosti u kutnom poravnanju pokretnog zrcala. Reflektirani snopovi sa zrcala Z i retroreflektora R rekombiniraju se u NPRS i odlaze u drugi polarizirani razdjelnik snopa PRS2 gdje se snopovi dijele na snop referentnog lasera i snop testiranog lasera te kao takvi dopijevaju na fotodetektor referentnog lasera RF i fotodetektor testiranog lasera TF na kojima se analiziraju interferencijski uzorci RL i TL. Broj izbrojenih interferencijskih linija N_1 referentnog lasera poznate valne duljine λ_1 i broj izbrojenih interferencijskih linija testiranog lasera N_2 koristi se za izračunavanje valne duljine testiranog lasera λ_2 prema jednadžbama(3):

$$d_1 = \frac{N_1 \lambda_1}{2}$$

$$d_2 = \frac{N_2 \lambda_2}{2}$$

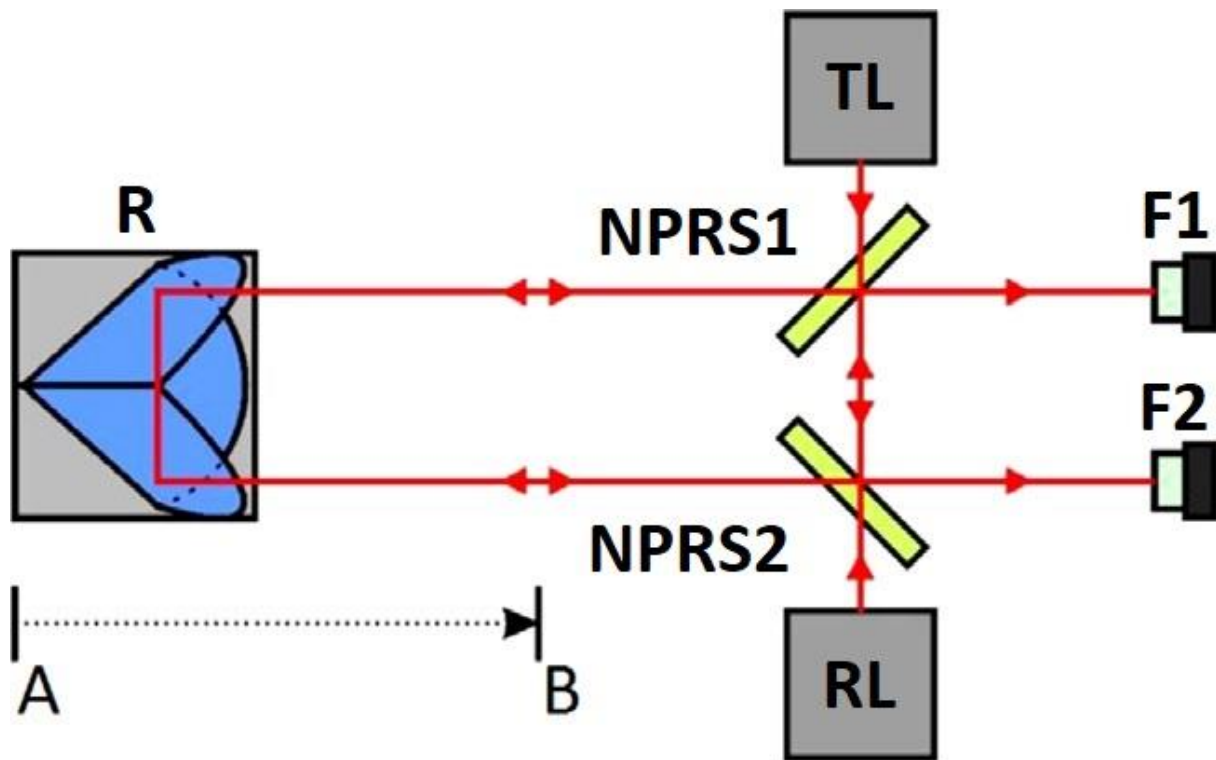
$$d_1 = d_2 \quad (3)$$

$$\frac{N_1 \lambda_1}{2} = \frac{N_2 \lambda_2}{2}$$

$$\lambda_2 = \frac{N_1 \lambda_1}{N_2}$$

2.2.1.2. Kowalskijev interferometar

Jedan od zanimljivijih interferometarskih sustava, a posebno zbog svoje jednostavne konstrukcije je Kowalskijev interferometar. Njegov postav prikazan je na slici [Slika 11 Slika 11. Kowalskijev interferometar].



Slika 11. Kowalskijev interferometar[16]

Snopovi referentnog lasera RL, i testiranog lasera TL postavljeni su koaksijalno i u suprotnim smjerovima prolaze kroz nepolarizirane razdjelnike snopa NPRS1 i NPRS2. Razdjelnik snopa NPRS2 dijeli laserski snop RL na 2 dijela, jedan dio prolazi kroz razdjelnik snopa NPRS2 te se reflektira na NPRS1 i direktno odlazi u foto detektor F1, dok se drugi dio snopa RL reflektira na razdjelniku snopa NPRS2 prema pomičnom retroreflektoru R i na povratku prolazi kroz NPRS1 te ulazi zajedno sa prvim dijelom snopa u fotodetektor F1 na kojemu se analiziraju interferencijski uzorci. Put snopa TL jednak je ali u obrnutom smjeru, Razdjelnik snopa NPRS1 dijeli laserski snop TL na 2 dijela, jedan dio prolazi kroz razdjelnik snopa NPRS1 te se reflektira na NPRS2 i direktno odlazi u fotodetektor F2, dok se drugi dio snopa TL reflektira na razdjelniku snopa NPRS1 prema pomičnom retroreflektoru R i na povratku prolazi kroz NPRS2 te ulazi zajedno sa prvim dijelom snopa u fotodetektor F2.

Značajna prednost ovakvog postava je njegova kompaktnost i relativno mali broj optičkih elemenata što značajno pridonosi stabilnosti sustava.

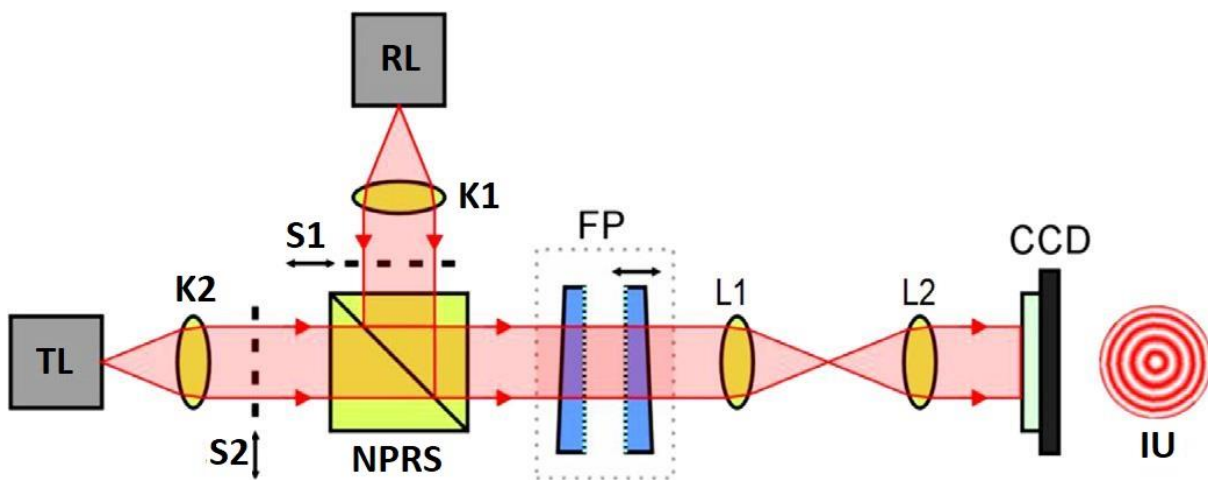
U svim gore opisanim tehnikama povećanje razlučivosti i točnosti mjerenja valne duljine zahtijeva povećanje promjene duljine optičkog puta, i time povećanje dimenzija mjernog interferometra.

2.2.2. Interferencijske metode bazirane na analizi periode interferencijskih linija

Za razliku od prethodno navedenih sustava, interferometri ovog tipa ne računaju valnu duljinu lasera brojanjem interferencijskih linija referentnog i testiranog lasera, već direktno mjere periodu referentnog i testiranog vala svjetlosti. Najčešće korišteni tipovi su Fabry-Perot, Fizeau te Young-ov interferometar.

2.2.2.1. Fabry-Perot interferometar

Osnovni princip rada Fabry-Perot interferometra prikazan je na slici [Slika 12].



Slika 12. Fabry-Perot interferometar[16]

Snopovi referentnog lasera RL i testiranog lasera TL formiraju se prolaskom kroz kolimatore K1 i K2, oba snopa moguće je zasjeniti sjenilima S1 i S2. Korištenjem nepolariziranog razdjelnika snopa NPRS oba snopa paralelno se uvode u Fabry-Perot interferometar nakon kojega prolaskom kroz sustav leća L1 i L2 stvara se interferencijski uzorak IU na čipu CCD kamere.

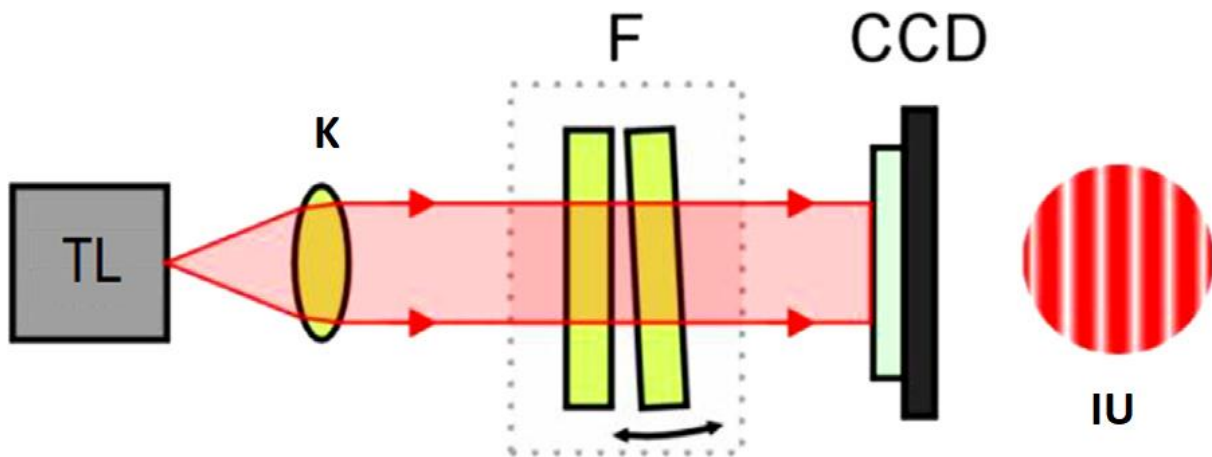
Kreirani interferencijski uzorak IU poprima oblik koncentričnih krugova, čiju je periodu moguće varirati promjenom udaljenosti između zrcala FP interferometra. Pomoću sjenila S1 i S2 moguće je naizmjenično uspoređivati interferencijski uzorak referentnog i testiranog lasera. Zadržavajući konstantnu i poznatu geometriju zrcala FP interferometra, analizom interferencijskog uzorka na CCD kameri moguće je izračunati valnu duljinu lasera.

Prednost ovakvog sustava je što nakon umjeravanja referentnim laserom, zadržavanjem geometrije zrcala konstantnom moguće određivati valnu duljinu testiranog lasera i bez uporabe

referentnog lasera. Zbog potrebe za zadržavanjem fiksne i stabilne geometrije zrcala ovakvi sustavi dosegli su relativnu mjernu nesigurnost od $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ [18]

2.2.2.2. Fizeau interferometer

Primjer sustava baziranog na Fizeau-ovom interferometru prikazan je na slici [Slika 13].



Slika 13. Fizeau interferometer[16]

Laserski snop testiranog lasera TL kolimiran je prolaskom kroz kolimator K te prolazi kroz Fizeau-ov interferometer F koji se sastoji od dvije plan-paralelne staklene ploče postavljene pod određenim kutem. Interferencija nastaje među snopovima reflektiranim sa površina dviju ploča koje gledaju jedna prema drugoj. Rezultantni interferencijski uzorak sastoji se od paralelnih interferencijskih linija koje se analiziraju direktno na čipu CCD kamere. Perioda interferencijskih linija ovisna je o kutu među staklenim pločama i valnoj duljini svjetlosti. Kao i u prethodno opisanom primjeru sustav se umjerava uporabom referentnog lasera poznate valne duljine.

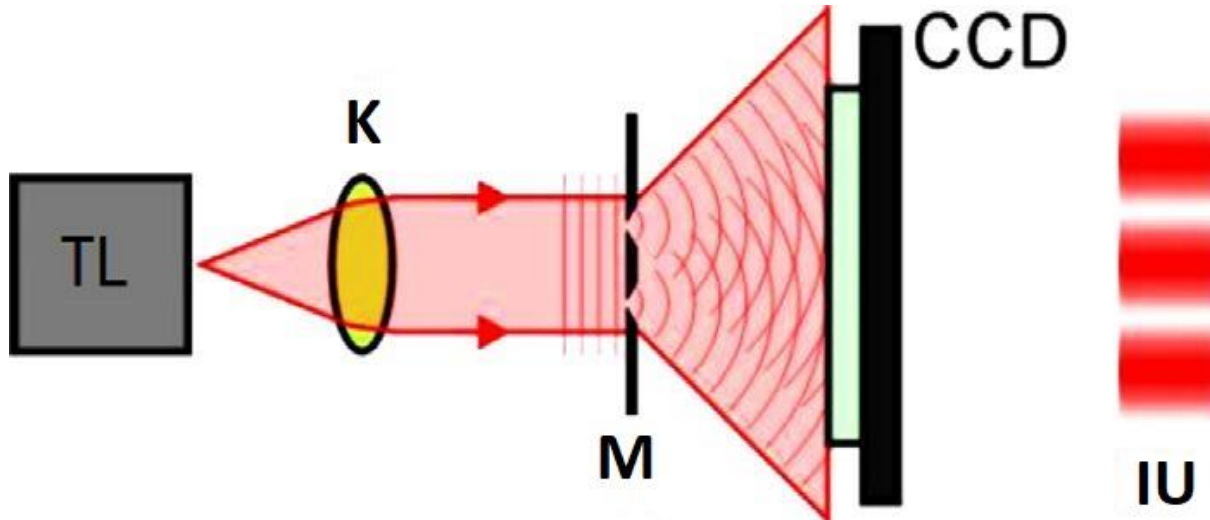
Prednosti Fizeau-ovog interferometra u odnosu na Fabry-Perot-ov interferometer su paralelna distribucija interferencijskih linija te nedostatak potrebe za korištenjem sustava leća za dobivanje slike na CCD detektoru što pridonosi kompaktnosti sustava i jednostavnijoj konstrukciji.

Nedostatak je da interferometri ovog tipa zahtijevaju optičke rezonatore (plan-paralelne staklene ploče) s ravnosti površine od $1/200$ valne duljine.

Koristeći ovaj tip interferometra tvrtka HighFinesse GmbH [19] postigla je relativnu mjernu preciznost od $2 \cdot 10^{-8}$ (u rasponu ± 2 nm od umjerene valne duljine) u komercijalnom uređaju, dok je preciznost u području ± 200 nm od umjerene valne duljine 5 puta manja.

2.2.2.3. Young-ov interferometar

Još jedna vrsta interferometra na čijoj bazi je razvijeno nekoliko mjernih sustava je Young-ov interferometar čiji je dijagram prikazan na slici[Slika 14]



Slika 14. Young-ov interferometar[16]

Laserski snop testiranog lasera TL se prvo kolimira prolaskom kroz kolimator K kako bi se dobila ravna valna fronta svjetlosti, koja zatim prolazi kroz membranu M koja se sastoji od dva paralelna proreza. Interferencijski uzorak IU direktno se analizira na CCD čipu kamere, a njegova perioda ovisi o razmaku između dva proreza na membrani i valnoj duljini testiranog lasera. Na osnovu tih podataka izračunava se valna duljina testiranog lasera.

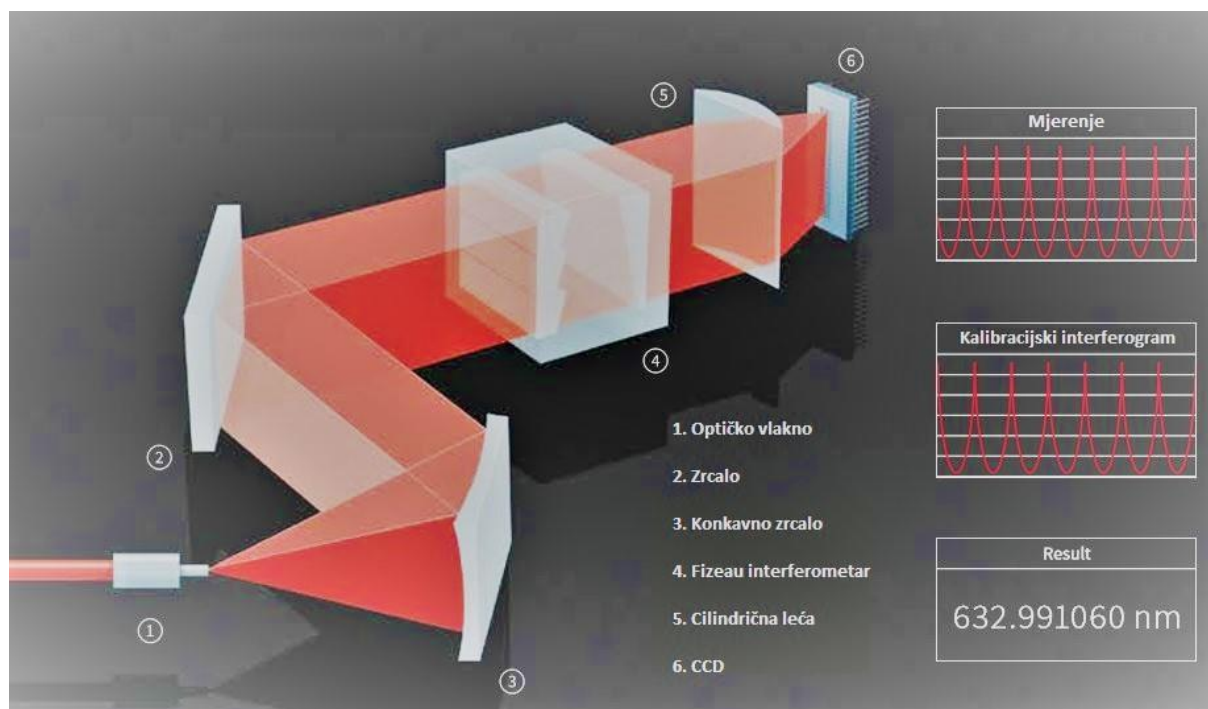
2.2.3. Pregled komercijalno dostupnih sustava za umjeravanje valne duljine

2.2.3.1. Toptica HighFinesse WS serija



Slika 15. HighFinesse WS-7 interferometar[20]

WS serija interferometara za mjerenje valne duljine tvrtke Toptica HighFinesse bazirana je na principu rada Fizeau-ovog interferometra. Za postizanje izuzetno visoke preciznosti i stabilnosti koriste nepomične optičke elemente.



Slika 16. Princip rada WS serije interferometara[20]

Laserski snop uvodi se u uređaj pomoću optičkog vlakna, a zatim se kolimira poču zrcala i uvodi u Fizeau-ov interferometar nepromjenjive geometrije. Interferencijski uzorak se potom analizira na CCD čipu i uspoređuje sa prethodno snimljenim interferencijskim uzorkom referentnog lasera na osnovu čega se izračunava valna duljina testiranog lasera.

Pregled modela WS serije dan je u tablici [Tablica 2]:

Tablica 2. Pregled modela WS serije interferometara[20]

			LSA	WS5	WS6-600	WS6-200	WS7	WS7-30	WS8	WS8-2
Mjerni raspon	standard	330 - 1180 nm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	UV-I	248-1180 nm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	UV-II	192-800 nm		✓	✓	✓	✓			
	UV-II/VIS	192-1180 nm	✓							
	VIS/IR	330-1750 nm	✓	✓	✓	✓				
	VIS/IR-II	500-2250 nm	✓	✓	✓	✓				
	IR-I	630-1750 nm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	IR-II	1000-2250 nm	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
	IR-III	2-11 μm	✓	✓		✓				
Apsolutna preciznost		192-330 nm [pm]	6	3	0.6	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1
		330-420 nm [pm]	3	2	0.3	0.2	0.04	0.02	0.01	0.01
		420-1100 nm [MHz]	6000	3000	600	200	60	30	10	2
		1100-2250 nm [MHz]	12000	2000	400	150	40	20	10	
		2-11 μm [MHz]	1-5 nm ₃)	3000		200				
Kalibracija			Ugrađena	Ugrađena	Ugrađena	Ugrađena	Ugrađena	Vanjska	Vanjska	Vanjska

2.2.3.2. Bristol instruments



Slika 17. Bristol Instruments interferometar serije 671[21]

Bristol instruments proizvodi nekoliko modela interferometara za mjerenje valne duljine lasera baziranih na Michelsonovom interferometru sa skenirajućim zrcalom i to u dvije grupe, „scientific“ namijenjene znanstvenim ustanovama i laboratorijima, i WDM specifično namijenjene testiranju lasera za optičku telekomunikaciju. Na slici [Slika 17] prikazan je uređaj iz 671 serije interferometara za mjerenje valne duljine i to iz „scientific“ grupe proizvoda.

671 serija sastoji se od 2 modela interferometara, 671A i 671B, a njihove karakteristike dane su u sljedećoj tablici [Tablica 3].

Tablica 3. Karakteristike interferometara serije 671[21]

Model	671A	671B
Tip lasera	Kontinuitano i kvazi kontinuirano zračenje (>10MHz)	
Raspon valnih duljina	VIS: 375 – 1100 nm NIR: 520 – 1700 nm IR: 1 – 5 μm	VIS: 375 – 1100 nm NIR: 520 – 1700 nm IR: 1 – 5 μm MIR: 1.5 – 12 μm
Preciznost	± 0.2 ppm ± 0.0002 nm @ 1000 nm ± 0.002 cm^{-1} @ 10,000 cm^{-1} ± 60 MHz @ 300,000 GHz	± 0.75 ppm (± 1 ppm for MIR) ± 0.0008 nm @ 1000 nm ± 0.008 cm^{-1} @ 10,000 cm^{-1} ± 225 MHz @ 300,000 GHz
Ponovljivost mjerenja	VIS/NIR: ± 0.03 ppm IR: ± 0.06 ppm	± 0.1 ppm
Kalibracija	Kontinuirana s ugrađenim stabiliziranim HeNe laserom	Kontinuirana s ugrađenim standardnim HeNe laserom
Display Resolution	9 znamenaka	8 Znamenaka
Mjerne jedinice	nm, μm , cm^{-1} , GHz, THz	
Preciznost kalibracije snage	$\pm 15\%$	
Maksimalna propusnost	1 GHz	10 GHz
Minimalna ulazna snaga	VIS: 20 – 250 μW NIR: 10 – 580 μW IR: 65 – 750 μW	VIS: 10 – 110 μW NIR: 10 – 250 μW IR: 65 – 750 μW MIR: 120 – 925 μW
Frekvencija mjerenja	VIS/NIR: 4 Hz IR: 2.5 Hz	VIS/NIR: 10 Hz IR/MIR: 2.5 Hz

2.2.3.3. Keysight 86120D i 86122C Multi-Wavelength Meters



Slika 18. Keysight technologies 86120D[22]

Keysight technologies ima u ponudi 2 interferometra također bazirana na Michelsonovom tipu interferometra, 86122C i 86120D. Na slici [Slika 18] prikazan je uređaj Keysight 86120D, a u tablici [Tablica 4] nalazi se usporedba karakteristika sa modelom 86122C.

Tablica 4. Karakteristike 86122C i 86120D interferometara[22]

	86120D	86122C
Valna duljina		
Raspon	700 - 1650 nm (182 - 428 THz)	1270 - 1650 nm (182 - 236 THz)
Preciznost		
	± 1.5 ppm typ. ± 1 ppm (15 °C - 35 °C)	± 0.2 ppm (15°C - 35°C)
At 1550 nm	± 2.3 pm	± 0.3 pm
At 1310 nm	± 2.1 pm	± 0.3 pm
Differential accuracy ¹	± 0.4 ppm	± 0.15 ppm
Minimum resolvable separation ¹ (equal power lines input)		
	15 GHz	5 GHz
At 1550 nm	0.12 nm	0.04 nm
At 1310 nm	0.09 nm	0.03 nm
Razlučljivost		
	0.0001 nm	

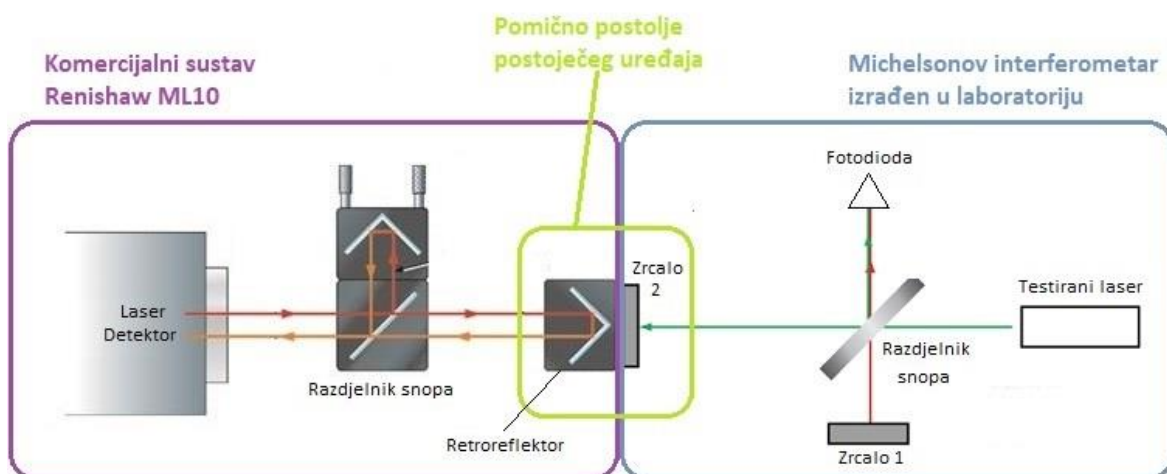
3. PRIJEDLOG PRAKTIČNE IZVEDBE INTERFERENCIJSKOG SUSTAVA ZA UMJERAVANJE VALNE DULJINE LASERA

Imajući u vidu opremu dostupnu u laboratoriju za precizna mjerenja dužina (LFSB) za izradu sustava za umjeravanje valne duljine lasera odlučili smo se za izradu sustava baziranog na Michelsonovom interferometru.

Kako se kod postava Michelsonovog interferometra za mjerenje valne duljine povećanjem promijene optičkog puta ujedno povećava i preciznost određivanja iste odlučeno je iskoristiti stari jednoosni uređaj za mjerenje duljine koji već neko vrijeme nije u funkciji, ali je izuzetno robusne konstrukcije i posjeduje kvalitetnu stazu za vođenje sto je vrlo važno za stabilno vođenje pomičnog kraka Michelsonovog interferometra.

Ideja je na taj uređaj postaviti modernu mjernu opremu koja bi se sastojala od Michelsonovog interferometra sastavljenog od gotovih modula (zrcala, razdjelnici snopa, ploče za ugradnju modula...) dostupnih u laboratoriju za precizna mjerenja dužina i komercijalnog laserskog interferometra za mjerenje dužine proizvođača Renishaw model ML10.

Na sljedećoj slici [Slika 19] prikazana je shema idejnog koncepta postava sustava.



Slika 19. Shema idejnog koncepta postava sustava

Idejni princip rada ovog postava je iskoristiti Michelsonov interferometar izrađen u laboratoriju za mjerenje broja interferencijskih linija testiranog lasera nepoznate valne duljine prilikom pomaka pomičnog postolja postojećeg uređaja, a u isto vrijeme iskoristiti komercijalni laserski

interferencijski sustav za precizno određivanje pomaka, te kombinacijom dobivenih mjerenja izračunati nepoznatu valnu duljinu testiranog lasera.

3.1. Korištena oprema dostupna u laboratoriju

3.1.1. Postojeći uređaj

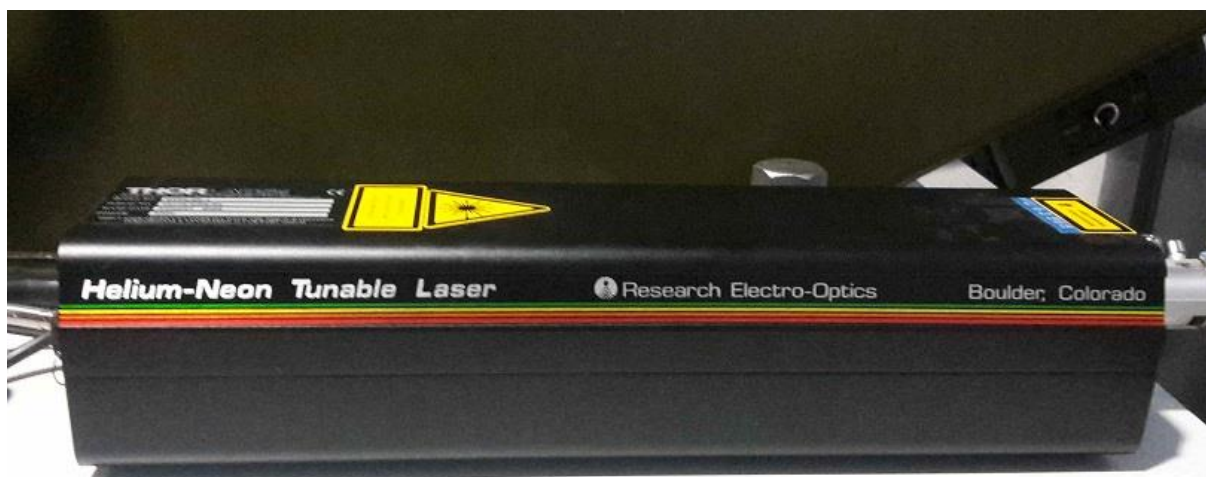
Na sljedećoj slici [Slika 20] prikazan je postojeći jednoosni mjerni uređaj proizvođača Carl Zeiss koji je već neko vrijeme izvan uporabe zbog zastarjelosti i nefunkcionalnosti mjernog sustava, no nama je zanimljiv zbog veoma robusne konstrukcije i kvalitetnih staza za vođenje koje možemo iskoristiti za pomak pomičnog kraka Michelsonovog interferometra. Uz to uređaj je iznimno velike mase (oko 300 kg) sto pridonosi stabilnosti sustava.



Slika 20. Postojeći jednoosni mjerni uređaj „Carl Zeiss“

3.1.2. Thorlabs Helium-Neon Tunable Laser HTPS-EC-1

Laser koji smo koristili kao testni laser u namjeri određivanja njegove valne duljine je HeNe laser proizvođača Thorlabs s mogućnošću podešavanja valne duljine, a prikazan je na slici [Slika 21], dok su u tablici [Tablica 5] dane tehničke specifikacije.



Slika 21. Thorlabs Helium-Neon Tunable Laser HTPS-EC-1

Tablica 5. Specifikacije Thorlabs HeNe HTPS-EC lasera

	HTPS	HTPS-EC
Valna duljina	633/612/604/594/543 nm	
Min izlazna snaga	4.0/2.5/0.5/0.6/0.3 mW	
Max izlazna snaga	10.0 mW	
Šum (30 Hz – 10 MHz)	<1% rms	
Polarizacija	Linear > 500:1	
Promjer snopa	0.77/0.76/0.75/0.74/0.71 mm	
Divergencija snopa	1.05/1.03/1.02/1.02/0.97 mrad	

3.1.3. Thorlabs modularni optički elementi i postolja

Za izradu Michelsonovog interferometra korišteni su gotovi modularni optički elementi i postolja montirana na Thorlabs-ovu ploču za prihvat modula. Na sljedećoj slici [Slika 22] prikazani su korišteni moduli, a u tablici [Tablica 6] dan je njihov popis.



Slika 22. Thorlabs-ovi moduli korišteni pri izradi interferometra

Tablica 6. Popis korištenih Thorlabs-ovih modula

Kodni naziv	Opis	Kom
KM100V/M	Kinematska V-stezaljka za pozicioniranje lasera	1
KM100	Kinematski nosač zrcala	2
BA1	Montažna baza za montažu modula na baznu ploču	4
CM1-BS013	Razdjelnik snopa	1

BA2R	Magnetska ploča	1
973/579-7227	Bazna ploča	1

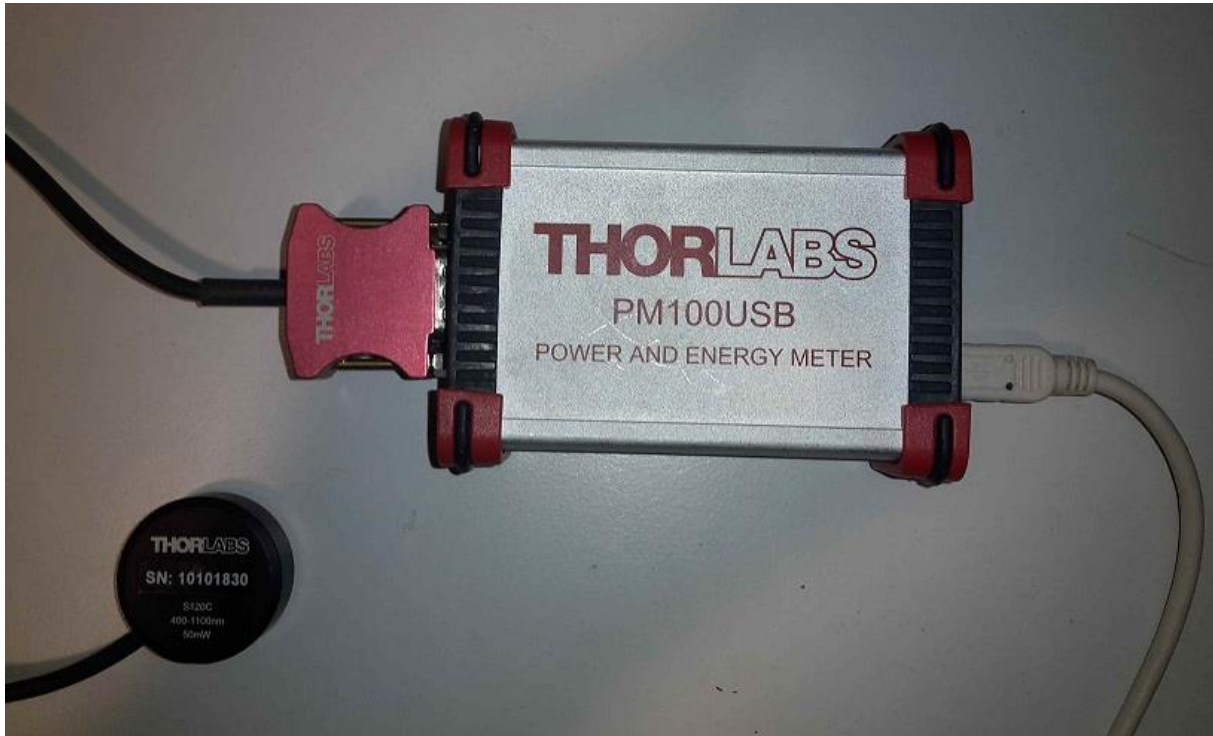
3.1.4. Olympus LMPlanFL N mikroskopski objektiv

Za bolju separaciju interferencijskih linija korišten je mikroskopski objektiv proizvođača Olympus, model LMPlanFL N sa 100x povećanjem.



Slika 23. Olympus LMPlanFL N mikroskopski objektiv sa 100x povećanjem

3.1.5. Thorlabs PM100USB + S120C



Slika 24. Thorlabs PM100USB mjerač intenziteta svjetlosti i S120C fotodioda

3.1.6. Thorlabs DET36A/M fotodetektor



Slika 25. Thorlabs DET36A/M fotodetektor

Tablica 7. Karakteristike DET36A/M fotodetektora

Specifikacije		
Detektor	-	Silicon PIN
Aktivna površina	-	3.6 x 3.6 mm (13 mm ²)
Raspon valnih duljina	λ	350 to 1100 nm
Vršna valna duljina	λ_p	970 nm
Vršni odziv	$\mathcal{R}(\lambda_p)$	0.65 A/W
Vrijeme odziva (635nm)	t_r	14 ns (Typ.)
Tamna struja	I_D	0.35 nA (Typ.) 6.0 nA (Max)
Izlazni napon	V_{OUT}	0 to 10 V

3.1.7. PCI-DAS6034 akvizicijska kartica



Slika 26. PCI-DAS6034 akvizicijska kartica

PCI-DAS6034 akvizicijska kartica raspolaže sa 16 analognih ulaza, koje je moguće konfigurirati kao nesimetrične ili diferencijalne ulaze (u slučaju diferencijalne konfiguracije 8 ulaza na raspolaganju). Svi ulazi su 16 bitne rezolucije.

Raspon ulaznog napona moguće je softwareski podesiti u 4 raspona: $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 500mV$ i $\pm 50mV$.

Maksimalna brzina uzorkovanja iznosi 200kS/s (200000 uzoraka u sekundi)

3.1.8. Renishaw ML10 laserski interferometar



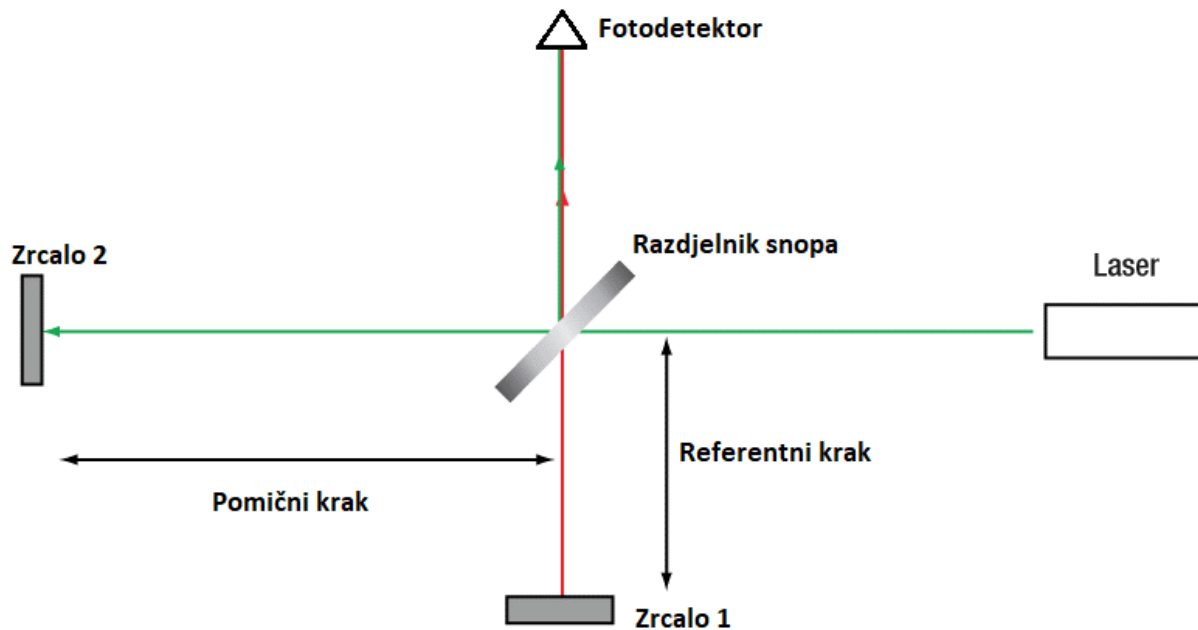
Slika 27. Renishaw ML10

Tablica 8. Tehnički podaci ML10 interferometra

Tehnički podaci	
Preciznost sustava	$\pm 0,7 \mu\text{m/m}$
Rezolucija sustava	1 nm pri brzini pomaka od maks 1m/s
Mjerni raspon	do 40 m
Tip lasera	Helij-Neon (Klasa 2)

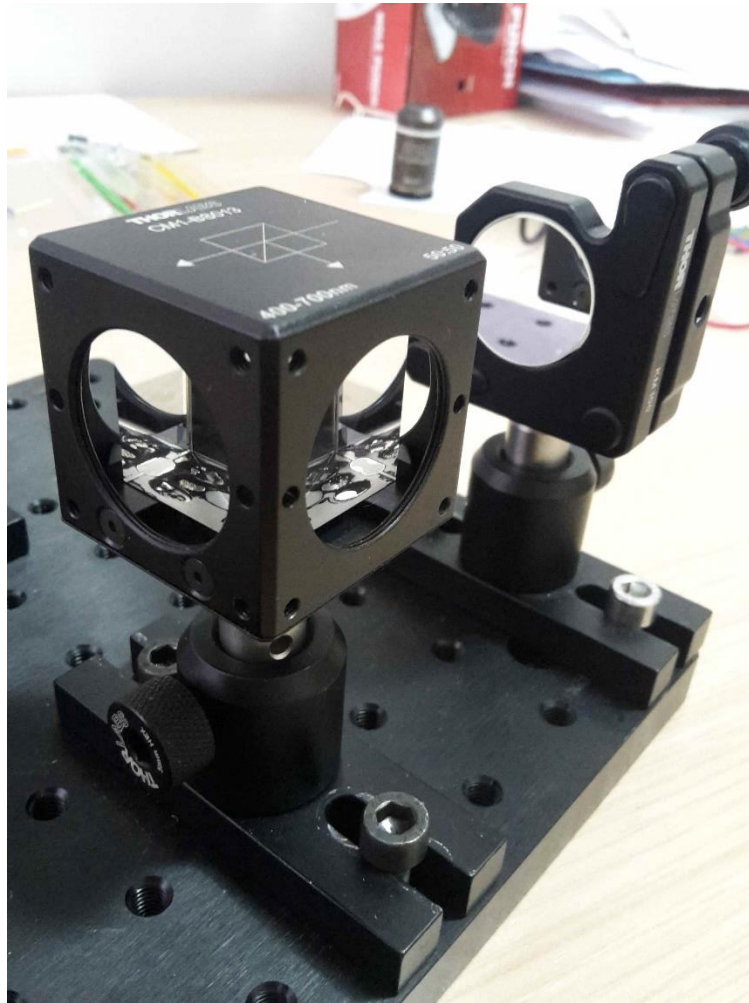
4. IZRADA PREDLOŽENOG SUSTAVA

Prvo je bilo potrebno izraditi osnovni dio sustava koji će služiti za prebrojavanje interferencijskih linija testiranog lasera. Taj dio sustava bazirali smo na osnovnom tipu Michelsonovog interferometra prikazanom na slici [Slika 28].

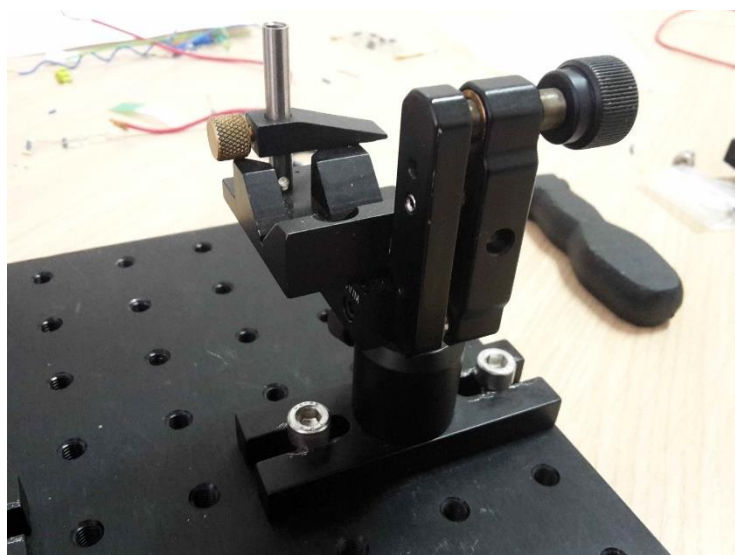


Slika 28. Osnovni postav Michelsonovog interferometra

Interferometar je sastavljen od prethodno navedenih Thorlabsovih modula ugrađenih na ploču za prihvat modula. Sva postolja modula (BA1) se na ploču ugrađuju M6 vijcima, a potom se na postolja ugrađuju ostali moduli poput zrcala, V-stezaljke za postavljanje lasera, razdjelnika snopa i fotodetektora. Na sljedećim slikama su prikazani moduli ugrađeni na ploču za prihvat modula.



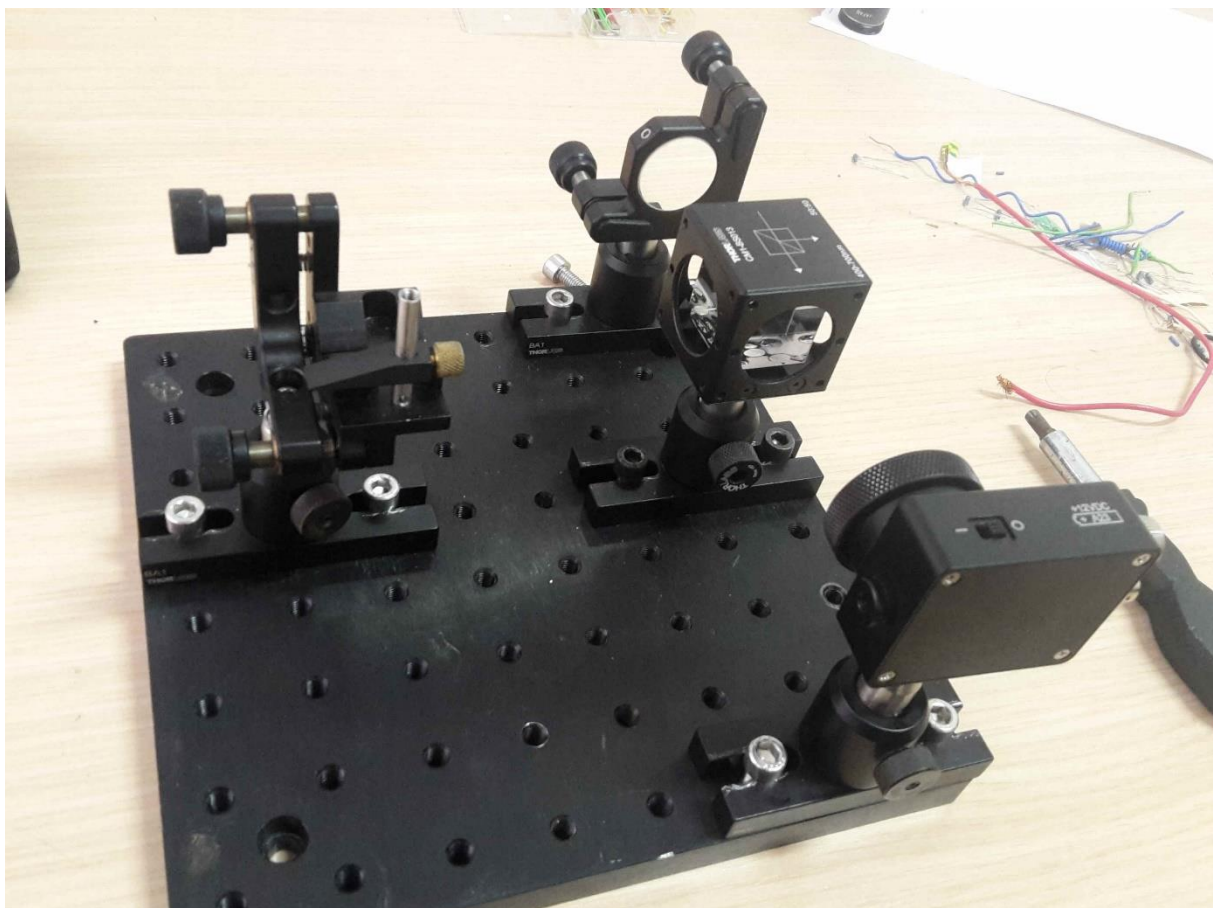
Slika 29. Razdjelnik snopa i zrcalo



Slika 30. V-stezaljka za postavljanje lasera



Slika 31. Fotodetektor



Slika 32. Postav modula na ploči (bez pomičnog zrcala)

Kako je aktivna površina fotodiode dimenzija 3.6 mm x 3.6 mm vidljivo iz tablice [Tablica 7], a promjer laserske zrake korištenog lasera između 0.7mm i 0.8 mm [Tablica 5], događa se to da sve interferencijske linije padaju na površinu fotodetektora zajedno, pa pri pomaku pomičnog zrcala fotodetektor ne može detektirati pomicanje interferencijskih linija. Kako bi taj problem riješili bilo je potrebno ugraditi optički element kako bi disperzirali laserski snop usmjeren prema fotodetektoru i dobili veću separaciju interferencijskih linija. U tu svrhu korišten je mikroskopski objektiv ugrađen direktno na kućište razdjelnika snopa [Slika 33], te je ujedno dodana još jedna dodatna montažna ploča manjih dimenzija kako bi se povećala udaljenost fotodetektora od mikroskopskog objektiva. Na slici [Slika 34] prikazan je konačni postav modula koji ne uključuje pomično zrcalo koje će kasnije biti ugrađeno na pomično postolje postojećeg jednoosnog mjernog uređaja.

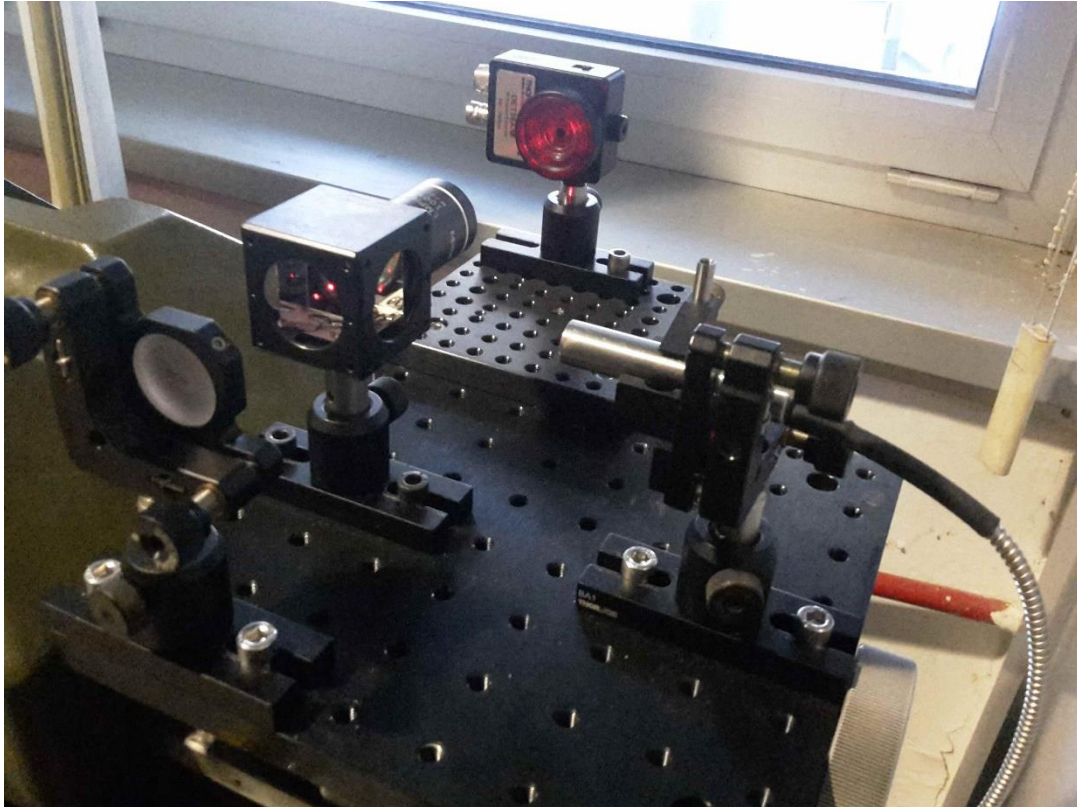


Slika 33. Mikroskopski objektiv ugrađen na kućište razdjelnika snopa



Slika 34. Konačni postav modula (bez pomičnog zrcala)

Nakon sklapanja modula u uredu, sklop je prenesen i postavljen na postojeći jednoosni mjerni uređaj[Slika 35] i ugrađeno zrcalo na pomični krak uređaja[Slika 36]. Uz to postavljen je i testni laser te komercijalni interferometar za mjerenje pomaka Renishaw ML10.



Slika 35. Nepomični dio interferometra postavljen na postojeći uređaj



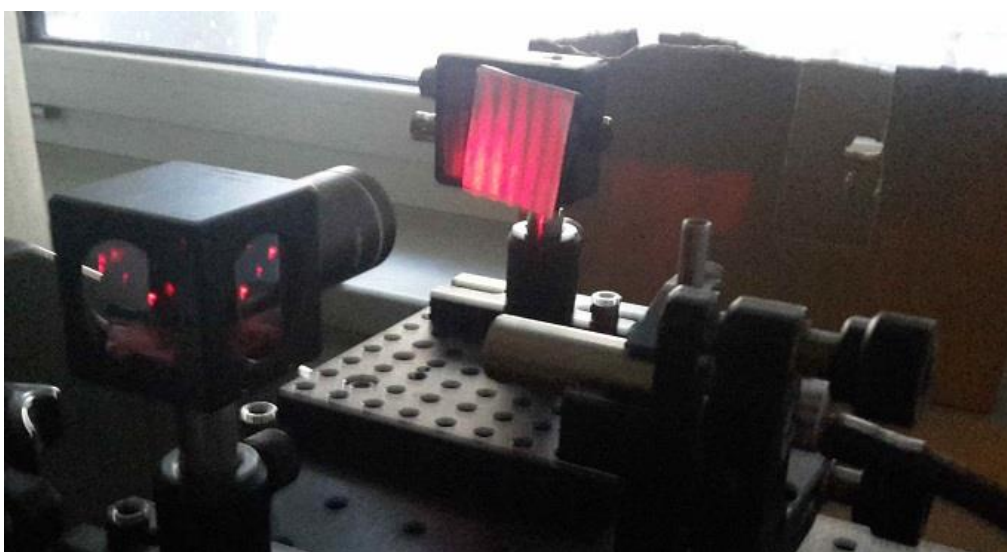
Slika 36. Pomična zrcala oba interferometra ugrađena na postojeći uređaj

Kako bi se umanjio utjecaj dnevnog svjetla i umjetnog osvjetljenja na fotodetektor u prostoriji u kojoj se nalazi uređaj te izbjeglo da dođe do prezasićenja fotodiode na nepomični dio postava interferometra postavljena je zaštita u obliku jednostavne kartonske kutije na kojoj su napravljeni otvori za laserski snop prema pomičnom zrcalu interferometra, optičko vlakno lasera i električne konekcije sa fotodetektorom[Slika 37].

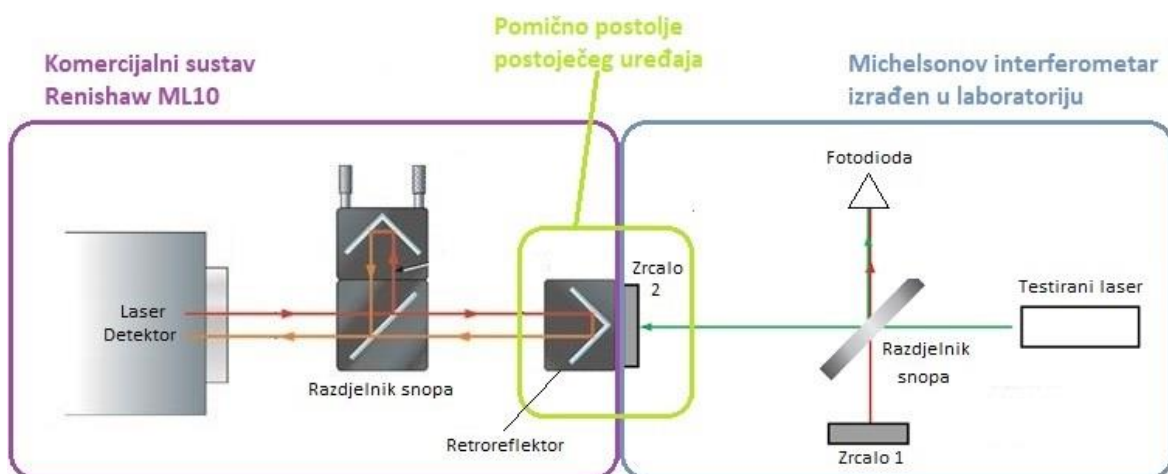


Slika 37. Zaštita od vanjskog utjecaja svjetlosti

Na sljedećoj slici[Slika 38] vide se interferencijske linije koje padaju na fotodetektor (bijeli papir postavljen je radi bolje vidljivosti prilikom podešavanja kuta zrcala i za potrebe fotografiranja), dok je na slici[Slika 39] prikazan je konačni postav sustava zajedno sa pripadajućom shemom.



Slika 38. Interferencijske linije na fotodetektoru

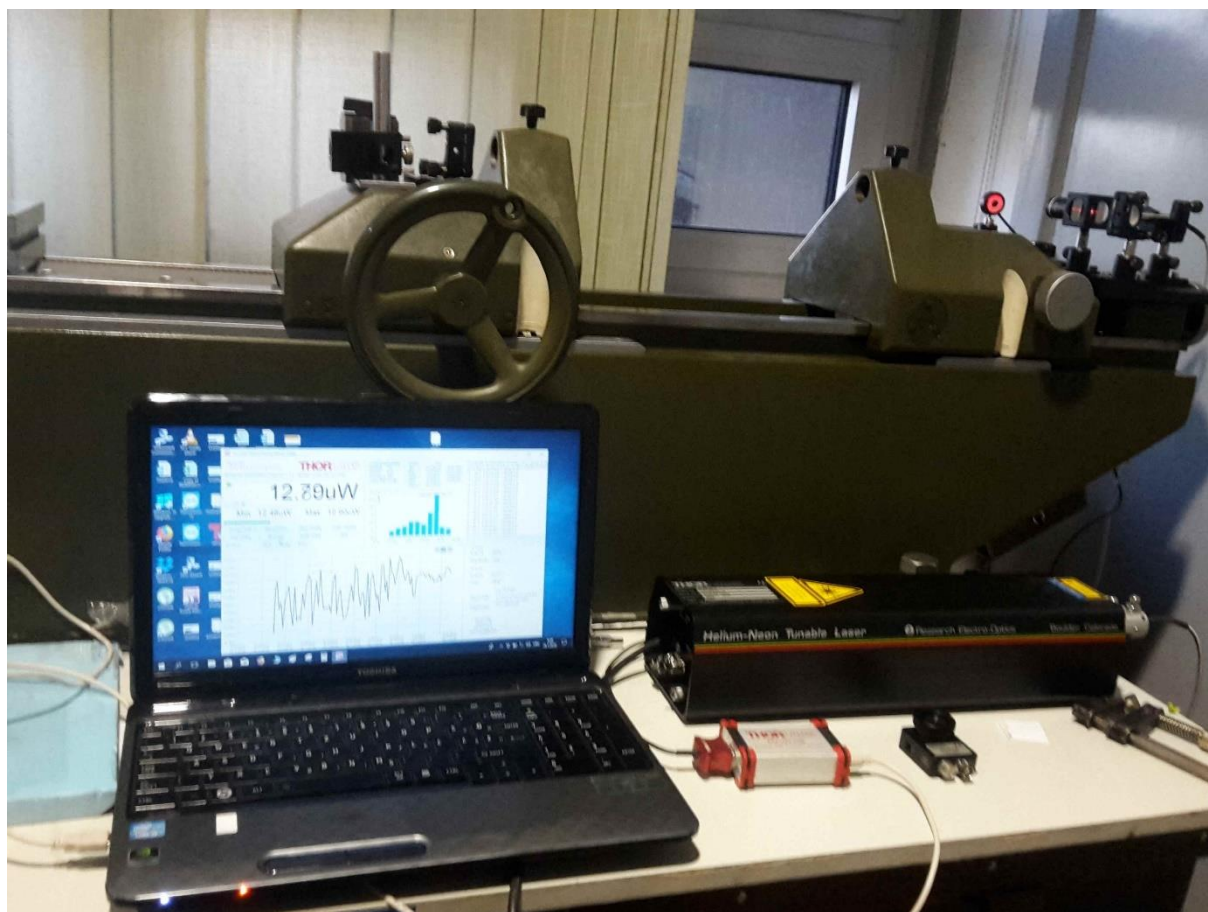


Slika 39. Konačni postav sustava sa pripadajućom shemom

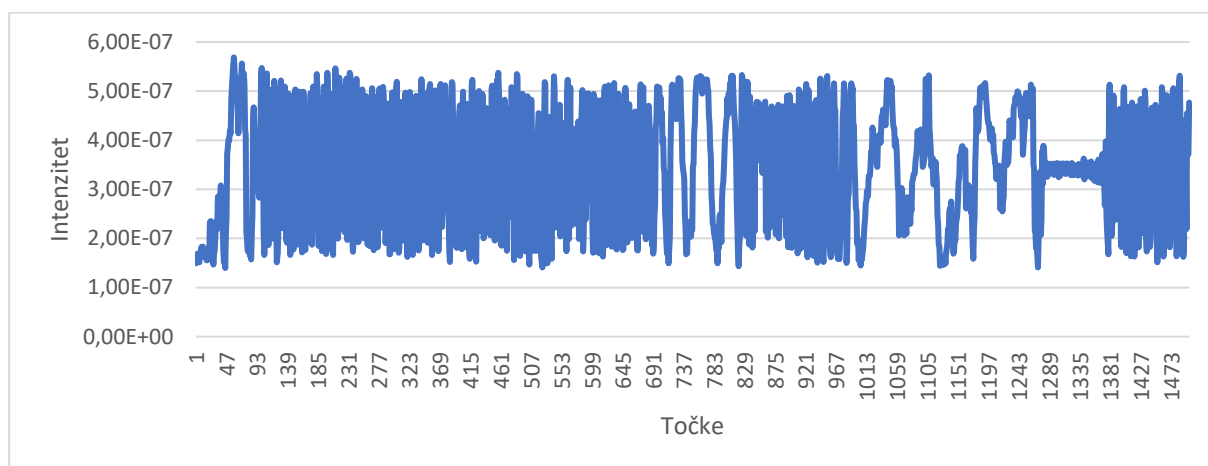
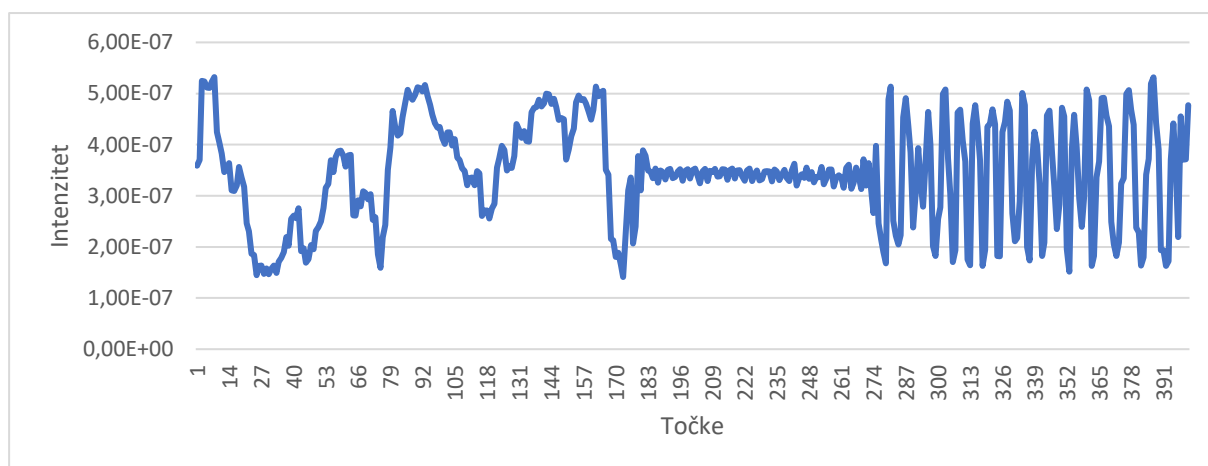
5. REZULTATI

5.1. Mjerenje korištenjem PM100USB

Početna mjerenja odrađena su Thorlabs-ovim uređajem PM100USB pošto je uređaj izuzetno kompaktan, prenosiv i jednostavan za povezivanje sa računalom putem USB sučelja, ideja je bila vidjeti dali je moguće tim uređajem snimiti pomak pokretnog zrcala interferometra, no kako se pomak vrši ručno i gotovo nemoguće je održavati malu i konstantnu brzinu pomaka, a već i pri malom trzaju preko fotodiode prijeđe veliki broj interferencijskih linija, pokazalo se da fotodioda koju taj uređaj primarno koristi za mjerenje intenziteta svjetlosti ima prespori odziv da bi uspješno snimili duži pomak potreban za precizno određivanje valne duljine. Na sljedećim slikama prikazano je mjerenje i dobiveni rezultati.



Slika 40. Mjerenje pomaka uređajem PM100USB

Graf 1. Mjerenje pomaka PM100USB 1500 točaka**Graf 2. Mjerenje pomaka PM100USB 400 točaka (1100-1500)**

U grafu [Graf 1] prikazano je mjerenje od 1500 točaka gdje se između 1300 i 1400 vidi područje gdje je došlo do malo bržeg pomicanja pokretnog zrcala i sustav zbog niske brzine uzorkovanja od samo 100S/s nije uspio pravilno registrirati prelazak interferencijskih linija preko fotodiode.

U grafu [Graf 2] vidi se odsječak prethodnog grafa u području između 1100 i 1500 točke mjerenja.

5.2. Mjerenje uređajem Agilent 53181A

Za sljedeće mjerenje korišten je fotodetektor DET36A/M sa vremenom odziva 14ns [Tablica 7], što osigurava da će detektor uspjeti registrirati sve interferencijske linije, no taj detektor se ne može jednostavno spojiti na računalo već zahtjeva dodatni hardware za akviziciju signala. U tu svrhu pokušano je iskoristiti mjerac frekvencije „Agilent 53181A“, no nažalost neuspješno pošto model „53181A“ koji smo imali na raspolaganju za razliku od bliskih modela iz serije (53131A i 53132A) nema funkciju „TOTALIZE“ koja mu omogućuje da funkcioniра kao brojač i na taj način signal iz fotodetektora iskoristi za prebrojavanje interferencijskih linija koje prijeđu preko fotodiode prilikom pomaka zrcala.



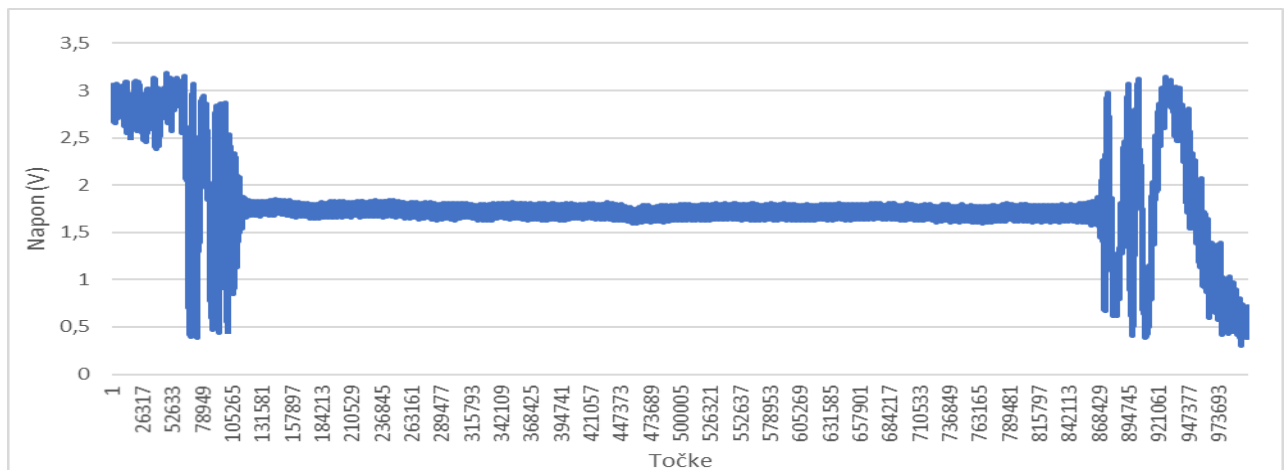
Slika 41. Agilent 53181A

5.3. Mjerenje PCI-DAS6034 akvizicijskom karticom

Nakon prethodnih neuspješnih pokušaja mjerenje je obavljeno računalom koje u sebi ima ugrađenu akvizicijsku karticu sa mogućnošću brzine uzorkovanja od 200kS/s.

Podaci sa mjerenja dani su u sljedećim grafovima:

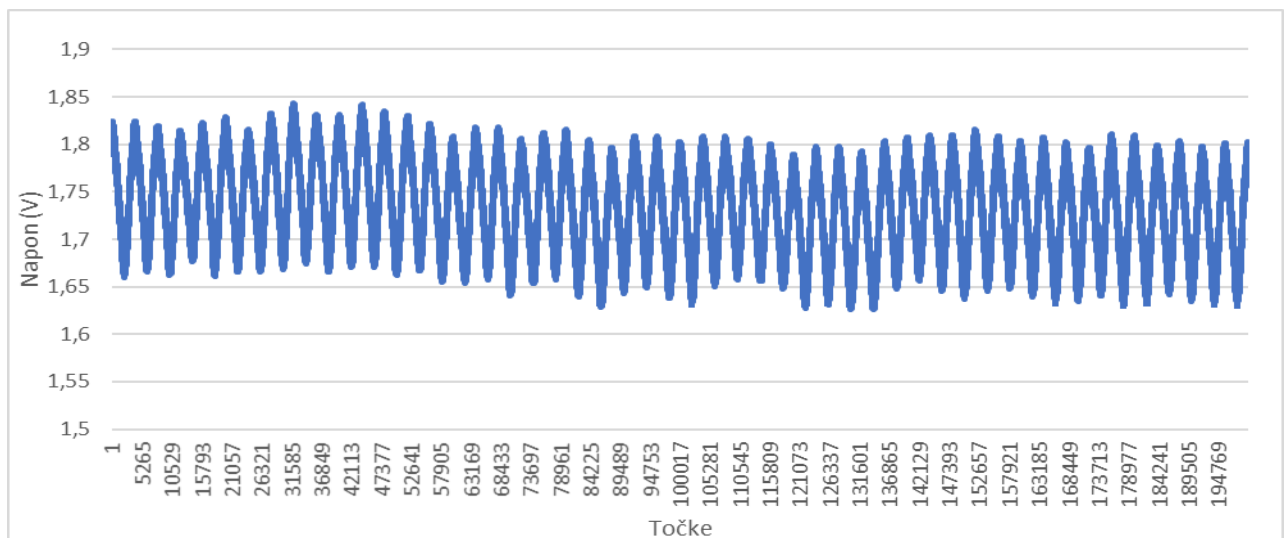
Graf 3. Snimljeni signal s interferometra 1000000 uzoraka (period 5 s)



Na grafu [Graf 3] prikazan je cijeli snimljeni signal, snimanje je vršeno brzinom uzorkovanja od 200kS/s, a započelo je prije kretanja pomičnog kraka i završilo nakon zaustavljanja pomičnog kraka interferometra. Dok je istovremeno komercijalnim interferometrom za mjerenje pomaka izmjeren pomak od 8,418 mm.

Kretanje pomičnog kraka interferometra započinje oko 105000. i zadržava oko 865000-og uzorka.

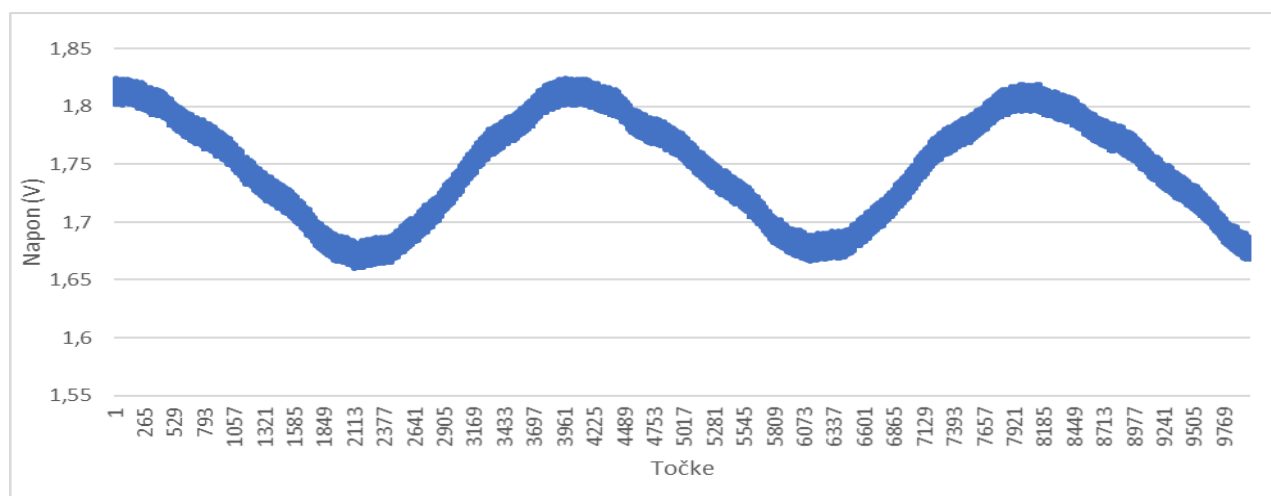
Graf 4. Odsječak snimljenog signala između 200000 i 400000 uzorka (period 1s)



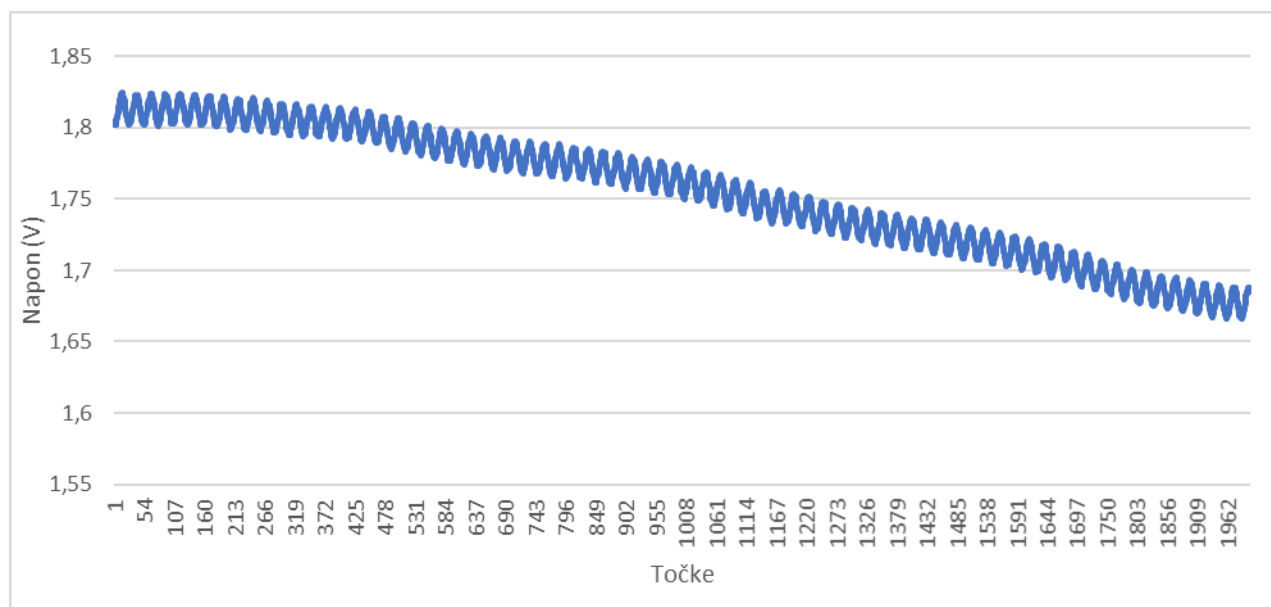
Na grafu[Graf 4] prikazan je odsječak snimljenog signala s interferometra između 200000 i 400000-og uzorka (200000 uzoraka) što uz brzinu uzorkovanja od 200kS/s predstavlja period od 1 s.

Iako na prvi pogled izgleda da je snimljeni signal dobiven sa fotodetektora uzrokovan prelaskom interferencijskih linija preko površine fotodiode tek daljnjom analizom vidi se da to nije točno. U ovom grafu lako se može izbrojati 50 sinusoidnih valova što odgovara frekvenciji elektroenergetske mreže od 50 Hz.

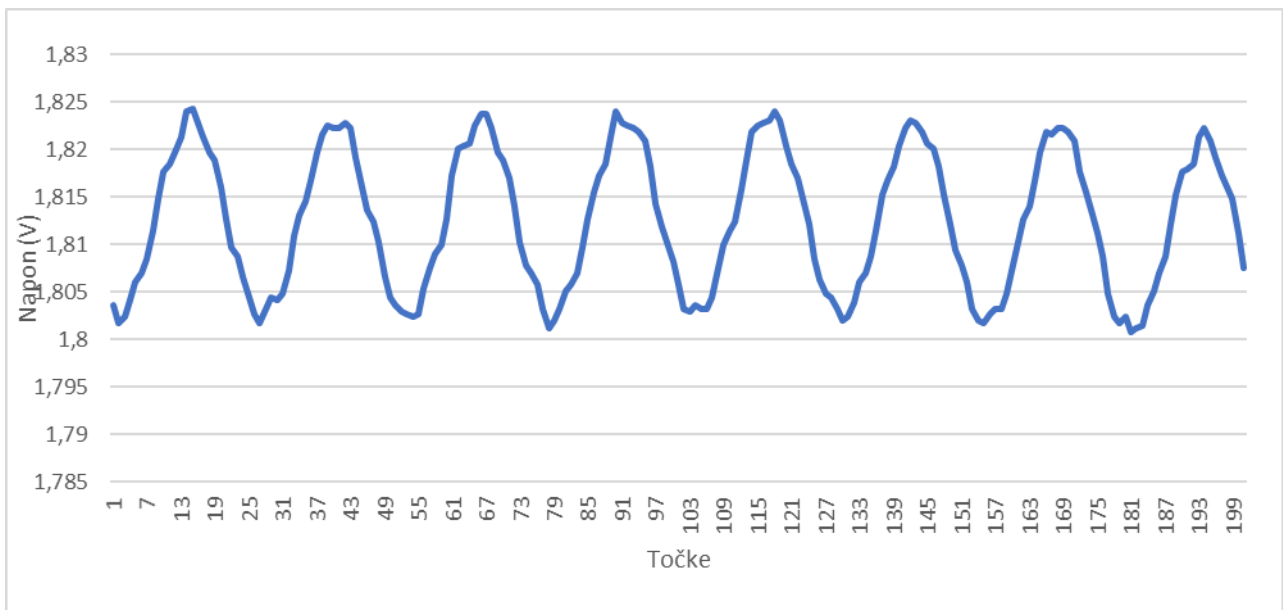
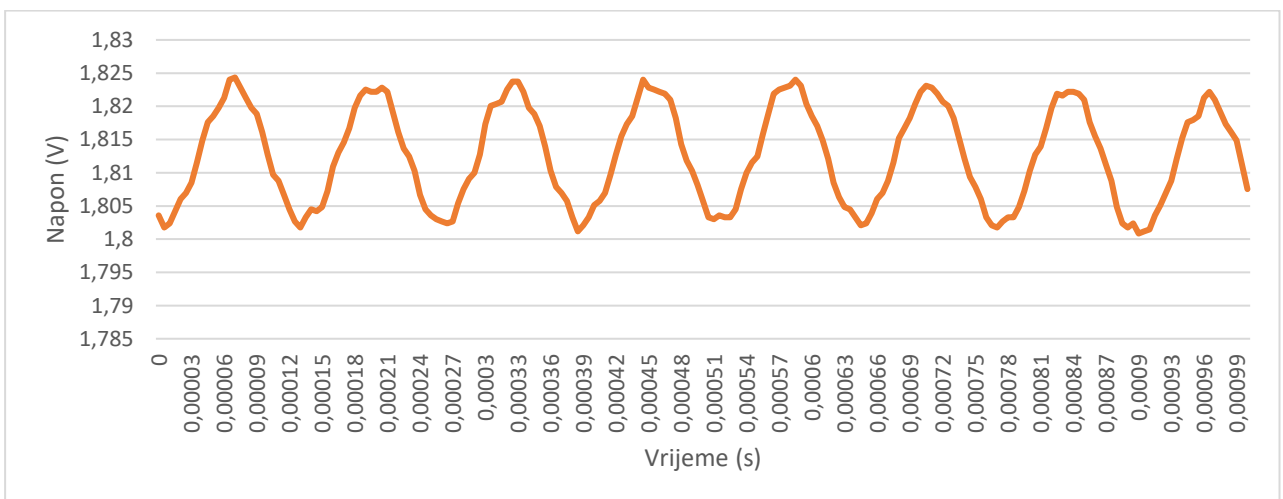
Graf 5. Odsječak snimljenog signala između 200000 i 210000 uzorka (period 0,05s)



Graf 6. Odsječak snimljenog signala između 200000 i 202000 uzorka (period 0,01s)



Tek analiziranjem još kraćih perioda uzorkovanja na grafovima[Graf 5] i [Graf 6] vidi se signal fotodetektora superponiran na signal elektroenergetske mreže.

Graf 7. Odsječak snimljenog signala između 200000 i 200200 uzorka (period 0,001s)**Graf 8. Odsječak snimljenog signala u periodu od 0,001s**

Analizom još kraćeg perioda uzorkovanja na grafovima [Graf 7] i [Graf 8] vidimo signal sa fotodetektora, ovdje se može izbrojati 8 registriranih prelazaka interferencijskih linija preko fotodetektora u periodu od 0,01s što odgovara frekvenciji od 8kHz što objašnjava zašto nije bilo moguće snimiti pokret uređajem PM100USB uz maksimalnu frekvenciju uzorkovanja od 100 S/s.

Analizom signala unutar navedenog područja (uzorci između 105000-865000 točke), utvrđeno je da je detektirano 26878 poluvalova nepoznate valne duljine, pri pomaku od 8,418 mm. Uvrštenjem tih podataka u jednadžbu (1) dolazi se do iznosa nepoznate valne duljine:

$$\lambda = 626,39 \text{ nm.}$$

Budući da je izvor svjetlosti u ovom primjeru bio temperaturno stabilizirani helij-neon laser čija nazivna valna duljina iznosi 632,8 nm, vidljivo je da se radi o značajnom odstupanju. Nažalost uz mnogo truda i pokušaja u prostoru gdje je smješten postojeći jednoosni mjerni uređaj na koji se nadograđivao nije bilo moguće otkloniti smetnje signala iz mreže i utjecaj ambijentalnog svjetla. Tek naknadnim premještanjem računala sa akvizicijskom karticom u laboratorij otkriveno je da su smetnje iz elektroenergetske mreže uzrokovane utičnicom sa neispravnim uzemljenjem u koju je sva oprema bila uključena. Navedene smetnje uzrokovale su konvoluciju interferencijskog signala sa signalom mreže, zbog čega je vjerojatno došlo do pogreške u brojanju interferencijskih pruga, a time i do pogreške u utvrđivanju valne duljine. Preliminarni rezultati koji su dobiveni u laboratorijskim uvjetima ukazuju da se ove greške u budućnosti mogu otkloniti, te da predloženi mjerni sustav na razini koncepta zadovoljava zahtjeve.

6. ZAKLJUČAK

Mjerenja su danas osnova svakodnevnog života, kako u privatnom, tako i poslovnom aspektu. Od potrebe mjerenja za osiguravanjem zdravstvenih standarda, preko raznih sigurnosnih pravila koja nastaju kao posljedica rezultata mjerenja do rezultata koji govore o održivosti određenih poslovnih sustava. Kako s tehnološkim razvojem i civilizacijskim napretkom alati za mjerenje i dobivanje informacija o širokom spektru potencijalnih interesa postaju sve jednostavniji i dostupniji, postavlja se pitanje razine znanja u korištenju alatima i razumijevanju dobivenih rezultata. Svjesnost konstantne potrebe preispitivanja tih alata i metoda korištenja alata, zbog rastuće potrebe za dobivanjem pouzdanih rezultata, osnova je za konstantni napredak, kako u znanosti tako i u njenoj sljedbenici, tehnologiji.

Na tragu toga je zadan zadatak na temelju savladanih znanja u okviru studija i dostupne opreme izraditi interferometarski sustav za umjeravanje valne duljine lasera

U okviru toga, osmišljen je mjerni sustav, postavljen je u probnom okruženju, te provedena su mjerenja.

Nažalost zbog prostora u kojem je jedan dio opreme bio smješten, a nije ga bilo moguće premjestiti i nedostatka vremena nismo bili u mogućnosti otkloniti sve smetnje na koje smo naišli tokom mjerenja (utičnica s neispravnim uzemljenjem, ambijentalna svjetlost, vibracije...) stoga nismo uspjeli dobiti tražene rezultate. Navedene smetnje uzrokovale su konvoluciju interferencijskog signala sa signalom mreže, zbog čega je vjerojatno došlo do pogreške u brojanju interferencijskih pruga, a time i do pogreške u utvrđivanju valne duljine.

Preliminarni rezultati koji su dobiveni u laboratorijskim uvjetima ukazuju da se ove greške u budućnosti mogu otkloniti, te da predloženi mjerni sustav na razini koncepta zadovoljava zahtjeve.

Bez obzira na neočekivane rezultate mjerenja možemo reći da je koncept sustava uspješan, te uz daljnja poboljšanja praktično primjenjiv.

Neka od poboljšanja koja bi svakako unaprijedila i učinila ovaj sustav praktično primjenjivim bila bi: smještaj uređaja u primjerenije okruženje (laboratorij), izrada kvalitetnije zaštite od svjetlosti, te ugradnja električnog pogona na pomično postolje postojećeg uređaja i integracija njegovog vođenja sa sustavom za prikupljanje i analizu podataka signala.

LITERATURA

- [1] Runje, B., Katedra za mjerenje i kontrolu, Predavanja iz kolegija teorija i tehnika mjerenja, Zagreb, 2014. (https://bib.irb.hr/datoteka/764412.Predavanja_TTM.pdf).
- [2] Runje, B., Katedra za mjerenje i kontrolu, Predavanja iz kolegija mjeriteljstvo, Zagreb, 2013. (https://bib.irb.hr/datoteka/764202.Predavanja_MJERITELJSTVO.pdf)
- [3] Zaimović-Uzunović, N., Mjeriteljska infrastruktura, Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet, Zenica, 2003. g str 15
- [4] <https://www.euramet.org/about-euramet/> (04.01.2018)
- [5] http://www.dzm.hr/o_mjeriteljstvu (04.01.2018)
- [6] <https://www.bipm.org/en/about-us/> (05.01.2018)
- [7] https://ec.europa.eu/growth/single-market/goods/international-aspects/mutual-recognition-agreements_hr (06.01.2018)
- [8] <http://www.coomet.org/> (06.01.2018)
- [9] <http://www.european-accreditation.org/about-us> (08.01.2018)
- [10] Howarth, P., Redgrave, F.; Metrology in short, 3rd edition; preveo Molnar, M.; Mjeriteljstvo ukratko 3. izdanje
<http://www.dzm.hr/download/repository/MjeriteljstvoUkratko3.pdf>
- [11] https://narodne-novine.nn.hr/files/_web/medjunarodni-dio/2017/129828/images/129828_35456.jpg (10.01.2018)
- [12] Mahović, S., Predavanja Teorija i tehnika mjerenja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za kvalitetu, Katedra za mjerenje i kontrolu,
- [13] <http://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854> (09.01.2018)
- [14] <https://www.britannica.com/science/destructive-interference> (09.01.2018)
- [15] <http://www.muelaner.com/laser-interferometers/> (08.01.2018)
- [16] Marek Dobosz, Mariusz Kozuchowski; Overview of the laser-wavelength measurement methods, Warsaw University of Technology, Faculty of Mechatronics, Institute of Metrology and Biomedical Engineering
- [17] Solomakha D , Toropov A . Laser wavelength measurements (review). Sov J Quantum Electron 1977;7:929–42 .
- [18] Thattey SS , Dongare AS , Dasgupta K , More SR , Nair LG . A wavemeter for measuring changes in wavelength of pulsed dye lasers. Rev Sci Instrum 1994;65:2470–4 .
- [19] http://www.highfinesse.com/misc/miscfiles/08_WSU_1_low.pdf

- [20] <http://www.highfinesse.com/en/wavelengthmeter>
- [21] <http://www.bristol-inst.com/products-and-services/bristol-instruments-wavelength-meters-scientific>
- [22] <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5988-5422EN.pdf?id=105579>
- [23] Taylor, B., N.,Thompson, A., THE INTERNATIONAL SYSTEM OF UNITS (SI), National Institute of Standards and Technology, Special Publication 330, Edition 2008.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tablica 8: Izvedene SI jedinice koje se izražavaju pomoću osnovnih SI jedinica : (Mjeriteljstvo ukratko, str. 54)

Tablica 9. Izvedene SI jedinice koje se izražavaju pomoću osnovnih SI jedinica

Izvedena veličina	Izvedena jedinica	Znak
ploština	četvorni metar	m^2
obujam	kubični metar	m^3
brzina	metar u sekundi	$m \times s^{-1}$
ubrzanje	metar u sekundi na kvadrat	$m \times s^{-2}$
kutna brzina	radijan u sekundi	$rad \times s^{-1}$
kutno ubrzanje	radijan u sekundi na kvadrat	$rad \times s^{-2}$
gustoća	kilogram po kubičnome metru	$kg \times m^{-3}$
jakost magnetskoga polja, (linearna gustoća struje)	amper po metro	$A \times m^{-1}$
gustoća struje	amper po četvornome metru	$A \times m^{-2}$
moment sile	Njutnmetar	$N \times m$
jakost električnoga polja	volt po metro	$V \times m^{-1}$
permeabilnost	henri po metro	$H \times m^{-1}$
permitivnost	farad po metro	$F \times m^{-1}$
specifični toplinski kapacitet	mol po kubičnome metru	$J \times kg^{-1} \times K^{-1}$
koncentracija (količine tvari)	mol po kubičnome metru	$mol \times m^{-3}$
osvjetljenje	kandela po četvornome metru	$cd \times m^{-2}$

- III. Tablica 9: Izvedene SI jedinice s posebnim nazivima i znakovima (Mjeriteljstvo ukratko, str. 55)

Tablica 10. : Izvedene SI jedinice s posebnim nazivima i znakovima

Izvedena veličina	Izvedena SI jedinica Posebni naziv	Znak Posebni znak	Izražena pomoću drugih jedinica	Izražena pomoću osnovnih SI jedinica
kut	radijan	rad		$m \times m = 1$
prostorni kut	steradian	sr		$m^2 \times m^{-2} = 1$
frekvencija	herc	Hz		s^{-1}
sila	njutm	N		$m \times kg \times s^{-2}$
tlak, naprezanje	paskal	Pa	N/m^2	$m^{-1} \times kg \times s^{-2}$
energija, rad, količina topline	džul	J	$N \times m$	$m^2 \times kg \times s^{-2}$
snaga, izrađeni tok	vat	W	J/s	$m^2 \times kg \times s^{-3}$
električni naboj, količina elektriciteta	kulon	C		$s \times A$
razlika električnih potencijala, elektomotorna sila	volt	V	W/A	$m^2 \times kg \times s^{-3} \times A^{-1}$
kapacitet	farad	F	C/V	$m^{-2} \times kg^{-1} \times s^4 \times A^2$
električni otpor	om	W	V/A	$m^2 \times kg \times s^{-3} \times A^{-2}$
električna vodljivost	simens	S	A/V	$m^{-2} \times kg^{-1} \times s^3 \times A^2$
magnetski tok	veber	Wb	Vs	$m^2 \times kg \times s^{-3} \times A^{-1}$
gustoća magnetskoga toka	tesla	T	Wb/m^2	$kg \times s^{-2} \times A^{-1}$
indukcija	henri	H	Wb/A	$m^2 \times kg \times s^{-3} \times A^{-2}$
Celzijeva temperatura	Celzijev stupanj	°C		K
svjetlosni tok	lumen	lm	cdsr	$m^2 \times m^{-2} \times cd = cd$
osvjetljenje	luks	lx	lm/m^2	$m^2 \times m^{-4} \times cd = m^{-2} \times cd$
aktivnost (radionuklida)	bekerel	Bq		s^{-1}
dozni ekvivalent	grej	Gy	J/kg	$m^2 \times s^{-2}$
ekvivalentna doza	sivert	Sv	J/kg	$m^2 \times s^{-2}$
katalitička aktivnost	katal	kat		$s^{-1} \times mol$

IV. Tablica 10: Izvedene SI jedinice čiji nazivi i znakovi uključuju izvedene SI jedinice s posebnim nazivima i znakovima (Mjeriteljstvo ukratko, str. 57)

Tablica 11. Izvedene SI jedinice čiji nazivi i znakovi uključuju izvedene SI jedinice s posebnim nazivima i znakovima

Izvedena veličina	Naziv	Znak	Izražena s pomoću osnovnih SI jedinica
dinamička viskoznost	paskal sekunda	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	$\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
moment sile	njutn metar	$\text{N}\cdot\text{m}$	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
površinska napetost	njutn po metru	N/m	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
kutna brzina	radijan u sekundi	rad/s	$\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}=\text{s}^{-1}$
kutno ubrzanje	radijan u sekundi na kvadrat	rad/s^2	$\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}=\text{s}^{-2}$
gustoća toplinskoga toka, zračivost	vat po kvadratnom metru	W/m^2	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$
toplinski kapacitet, entropija	džul po kelvinu	J/K	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
specifični toplinski kapacitet, specifična entropija	džul po kilogram kelvinu	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
specifična energija	džul po kilogramu	J/kg	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
toplinska vodljivost	vat po metar kelvinu	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$
gustoća energije	džul po kubičnome metru	J/m^3	$\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$
jakost električnoga polja	volt po metru	V/m	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{A}^{-1}$
gustoća električnog naboja	kulon po kubnom metru	C/m^3	$\text{m}^{-3}\cdot\text{s}\cdot\text{A}$
površinska gustoća električnog naboja	kulon po kvadratnom metru	C/m^2	$\text{m}^{-2}\cdot\text{s}\cdot\text{A}$
permitivnost	farad po metru	F/m	$\text{m}^{-3}\cdot\text{s}\cdot\text{A}$
permeabilnost	henri po metru	H/m	$\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-2}$
gustoća magnetskoga toka			$\text{m}^{-2}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^4\cdot\text{A}^2$
molarna energija	džul po molu	J/mol	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{mol}^{-1}$
molarna entropija, molarni toplinski kapacitet	džul po molkelvinu	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$
izlaganje (X- i g- zrakama)	kulon po kilogramu		$\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}\cdot\text{A}$
brzina apsorbirane doze	grej u sekundi	Gy/s	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$
jakost zračenja	vat po steradianu	W/sr	$\text{m}^4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}=\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$
koncentracija katalitičke aktivnosti	katal po kubičnome metru	kat/m^3	$\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mol}$

V. Tablica 11: Jedinice izvan SI prihvaćene zbog njihove široke rasprostranjenosti (Mjeriteljstvo ukratko, str. 58)

Tablica 12. Jedinice izvan SI prihvaćene zbog njihove široke rasprostranjenosti

Veličina	Jedinica	Znak	Vrijednost u SI jedinicama
vrijeme	minuta	min	1 min = 60 s
	sat	h	1 h = 60 min = 3 600 s
	dan	d	1 d = 24 h = 86 400 s
ravninski kut	stupanj	°	1° = ($\pi/180$) rad
	minuta	'	1' = (1/60)° = ($\pi/10 800$) rad
	sekunda	"	1" = (1/60)' = ($\pi/648 000$) rad
	grad	gon	1 gon = ($\pi/200$) rad
površina	hektar	ha	1 ha = 10 ⁴ m ²
obujam	litra	l, L	1 l = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³
masa	metrička tona	t	1 t = 10 ³ kg

VI. Tablica 12: Jedinice izvan SI koje se upotrebljavaju u posebnim područjima (Mjeriteljstvo ukratko, str. 58)

Tablica 13. Jedinice izvan SI koje se upotrebljavaju u posebnim područjima

Veličina	Jedinica	Znak	Vrijednost u SI jedinicama
tlak zraka, fluida	bar	bar	1 bar = 100 kPa = 10 ⁵ Pa
tlak tekućine u ljudskom tijelu	milimetar žive	mmHg	1 mmHg = 133,322 Pa
duljina	angstrom	Å	1 Å = 0,1 nm = 10 ⁻¹⁰ m
udaljenost	morska milja	M	1 morska milja = 1852 m
površina (presjeka)	bam	b	1 b = 10 ⁻²⁸ m ²
brzina	čvor		1 morska milja u satu = (1852/3600) m/s

VII. Tablica 13: Jedinice izvan SI koje se upotrebljavaju u posebnim područjima, a čije se vrijednosti određuju eksperimentalno (Mjeriteljstvo ukratko, str. 59)

Tablica 14. Jedinice izvan SI koje se upotrebljavaju u posebnim područjima, a čije se vrijednosti određuju eksperimentalno

Veličina	Jedinica	Znak	Definicija	Vrijednost SI jedinica
energija	elektronvolt	eV	1 eV je kinetička energija koju zadobije elektron pri prolazu kroz potencijalnu razliku od 1 volta u vakuumu.	1 eV = 1,602 176 53 (14) · 10 ⁻¹⁹ J
masa	jedinica atomske mase	u	1 u jednako je 1/12 mase atoma nuklida ¹² C u njegovu osnovnome stanju.	1 u = 1,660 538 86 (28) · 10 ⁻²⁷ kg
duljina	astronomska jedinica	ua		1 ua = 1,495 978 706 91 (6) · 10 ¹¹ m